



Department of Digital Business

**Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)**

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 4 (2025) pp: 4765-4773

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

---

## Dari Limbah Menjadi Material: Eksplorasi Hidroksiapatit Tulang Ayam sebagai *Filler* Membran Komposit

Nabella, Fithrah Inda Azizah

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

[nabellaann@gmail.com](mailto:nabellaann@gmail.com), [fithrahinda@gmail.com](mailto:fithrahinda@gmail.com)

### Abstrak

Peningkatan jumlah limbah tulang ayam sebagai bagian dari sampah rumah tangga membuka peluang pemanfaatannya sebagai sumber biomineral bernilai tambah, salah satunya hidroksiapatit (HAp). Studi ini mengevaluasi HAp hasil ekstraksi limbah tulang ayam sebagai filler dalam membran komposit berbasis polivinil alkohol (PVA) dan polietilen glikol (PEG). Hidroksiapatit diekstraksi melalui metode alkaline hydrothermal dikombinasikan dengan thermal decomposition, dan membran difabrikasi menggunakan teknik solvent casting molding pada cawan petri. Variasi konsentrasi HAp (0–5%) digunakan untuk menilai pengaruhnya terhadap daya serap air, karakteristik gugus fungsional, dan morfologi membran. Hasil water uptake menunjukkan bahwa penambahan HAp pada konsentrasi rendah hingga menengah meningkatkan porositas serta memperkuat interaksi gugus hidroksil dalam matriks polimer, dengan kondisi optimum pada 2% HAp. Pada kondisi ini, hasil analisis SEM menunjukkan struktur yang lebih terbuka dan kemampuan serap air yang lebih tinggi tanpa pematangan. Sebaliknya, konsentrasi di atas 2% menyebabkan aglomerasi partikel yang menurunkan homogenitas struktur dan mengurangi hidrofilitas membran. Analisis FTIR mengidentifikasi gugus-gugus fungsi yang berkaitan dengan PVA, PEG, dan HAp, dengan puncak karakteristik yang merepresentasikan gugus hidroksil, karbonat, dan fosfat, sehingga mengonfirmasi keberhasilan integrasi HAp ke dalam matriks membran. Temuan ini menegaskan potensi HAp alami dari limbah tulang ayam sebagai material penguat ramah lingkungan untuk pembuatan membran komposit, terutama pada aplikasi mikrofiltrasi dan pre-treatment air.

*Kata kunci:* Hidroksiapatit, Tulang Ayam, Membran Komposit, PVA-PEG, Water Uptake, Mikrofiltrasi

### 1. Latar Belakang

Pertumbuhan sampah rumah tangga telah menjadi permasalahan serius yang memberikan dampak negatif terhadap lingkungan seiring dengan pesatnya urbanisasi dan industrialisasi [1]. Meningkatnya konsumsi masyarakat terhadap daging ayam menyebabkan produksi limbah tulang ayam semakin meluas sebagai sampah rumah tangga. Peningkatan konsumsi ini berpotensi menghasilkan jumlah limbah tulang ayam yang cukup besar [2]. Meskipun seringkali dianggap tidak bernilai, limbah tulang ayam sebenarnya mengandung hidroksiapatit (HAp) dengan rumus kimia  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ , yaitu mineral kalsium fosfat yang memiliki potensi tinggi untuk dimanfaatkan kembali sebagai material bernilai ekonomi [3]. HAp dari tulang ayam juga diketahui mengandung elemen alami seperti garam, magnesium, dan karbonat, yang memberikan keunggulan biologis dibandingkan HAp hasil sintesis, terutama pada aplikasi regenerasi dan pertumbuhan tulang [1].

HAp merupakan senyawa kalsium fosfat yang tergolong sebagai biokeramik karena memiliki komposisi kimia yang serupa dengan fase mineral pada tulang dan gigi alami. HAp dikenal memiliki ketersediaan hayati tinggi serta biokompatibilitas yang baik terhadap jaringan manusia, sehingga banyak digunakan dalam berbagai aplikasi medis, seperti pengisi kavitas tulang [4]. Selain itu, berkat sifatnya yang stabil secara mekanik, kimia, dan termal serta memiliki permeabilitas yang baik, HAp juga mulai dimanfaatkan sebagai bahan tambahan dalam pembuatan membran [5].

Pada sisi lain, teknologi membran menjadi pilihan menarik untuk pemurnian air payau dan pengolahan air limbah karena biayanya yang relatif rendah, fleksibel, dan memiliki selektivitas tinggi [6], [7]. Membran komposit berbasis polimer semakin banyak dikembangkan dalam berbagai proses pemurnian. Meski demikian, membran polimer memiliki kekurangan, antara lain sifat hidrofilitas yang rendah serta kecenderungan mengalami fouling [8]. Oleh karena itu, modifikasi membran menjadi penting untuk meningkatkan kinerjanya,

salah satunya dengan menambahkan material aditif sebagai metode yang paling sederhana dan ekonomis [9]. Dalam hal ini, pencampuran HAp dengan polimer dapat memperbaiki sifat fisikokimia membran komposit, khususnya dalam aplikasi fabrikasi membran.

Secara umum, polimer yang digunakan dalam pembuatan membran adalah polimer non-*biodegradable* seperti *polyethersulfone* (PES), *polyvinylidene fluoride* (PVDF), dan *polysulfone* (PSf) [5]. Namun, pada penelitian ini digunakan polivinil alkohol (PVA) dan polietilen glikol (PEG) sebagai alternatif bahan polimer yang lebih ramah lingkungan karena bersifat tidak beracun serta mudah terurai [10]. PVA juga mudah larut dalam air dan memiliki stabilitas kimia serta termal yang baik, meskipun tetap memiliki kekurangan berupa sifat mekanik yang lemah dan selektivitas yang terbatas. Dengan demikian, pencampuran PVA dengan HAp dapat meningkatkan sifat mekanik, porositas, dan selektivitas membran [4], [11].

Berdasarkan perkembangan tersebut, terdapat peluang yang signifikan untuk mengintegrasikan hidroksiapatit yang berasal dari limbah tulang ayam ke dalam membran komposit berbasis PVA-PEG sebagai salah satu pendekatan berbiaya rendah yang berorientasi pada pemanfaatan limbah. Meskipun sejumlah penelitian telah mengevaluasi penggunaan HAp dalam berbagai aplikasi biomaterial [12], [13], dan sebagian studi telah menerapkannya pada pengembangan membran [5], [8], [10], pemanfaatan HAp alami dari tulang ayam sebagai *filler* dalam sistem membran komposit PVA-PEG masih sangat terbatas. Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada HAp sintesis atau pada membran yang dikembangkan tanpa mempertimbangkan sumber biomineral alami. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengkaji karakteristik awal membran berbasis HAp dari tulang ayam, terutama terkait perubahan sifat fisik, tingkat hidrofilisitas, serta morfologi permukaan akibat variasi konsentrasi HAp, masih jarang ditemukan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang penting, yaitu perlunya kajian fundamental yang lebih komprehensif untuk memahami efektivitas HAp alami sebagai *filler* dalam matriks polimer ramah lingkungan seperti PVA dan PEG.

Untuk menjembatani kesenjangan ilmiah tersebut, penelitian ini memanfaatkan limbah tulang ayam sebagai bahan utama dalam pembuatan membran komposit. HAp diperoleh melalui proses ekstraksi menggunakan metode *alkaline hydrothermal* yang dikombinasikan dengan *thermal decomposition*, sehingga dihasilkan biomineral yang kemudian diaplikasikan sebagai *filler* pada membran berbasis PVA-PEG. Proses fabrikasi membran dilakukan menggunakan teknik *solvent casting molding* khususnya pada cawan petri. Metode ini meliputi persiapan film polimer yang banyak diterapkan pada penelitian skala laboratorium karena prosedurnya relatif sederhana, tidak memerlukan peralatan berbiaya tinggi, serta memungkinkan evaluasi awal terhadap perubahan sifat membran akibat penambahan HAp. Melalui pendekatan ini, penelitian bertujuan mengembangkan membran berbasis limbah tulang ayam dan mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi HAp terhadap sifat-sifat membran, yang mencakup daya serap air, karakteristik gugus fungsional, dan morfologi permukaan. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi awal yang bermakna terkait potensi pemanfaatan biomineral dari limbah organik dalam pengembangan membran komposit PVA-PEG yang lebih ramah lingkungan.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah tulang ayam yang diperoleh dari aktivitas penjualan ayam di Pasar Tradisional Lempuyangan, Yogyakarta. Polivinil alkohol (PVA; densitas 1,269 g/cm<sup>3</sup>) diperoleh dari Sigma Aldrich, sedangkan polietilen glikol (PEG; densitas 1,1227 g/cm<sup>3</sup>) diperoleh dari Alpha Chem Products Experiment. Bahan kimia lain yang digunakan meliputi NaOH 1 M, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 0,6 M, dan akuades.

### 2.2. Sintesis Hidroksiapatit dari Tulang Ayam

Tulang ayam dicuci dengan air mengalir dan direbus pada suhu 100°C untuk menghilangkan sisa jaringan. Tulang kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 24 jam. Tulang kering dihancurkan dan direfluks dalam larutan NaOH 1 M selama 3 jam pada 70°C. Padatan hasil perlakuan dikalsinasi menggunakan furnace pada 1000°C untuk menghasilkan CaO.

Bubuk CaO yang telah diayak menggunakan ayakan 100 mesh selanjutnya dihidrolisis dengan akuades menggunakan rasio massa 15:2 (CaO:air). Larutan hasil hidrolisis diasamkan secara bertahap menggunakan

larutan  $\text{H}_3\text{PO}_4$  0,6 M pada laju penambahan 5 mL/menit pada suhu  $40^\circ\text{C}$  sambil diaduk menggunakan magnetic stirrer. Suspensi yang terbentuk kemudian didiamkan pada suhu ruang selama 24 jam. Endapan disaring dan dikeringkan dalam oven pada suhu  $110^\circ\text{C}$  selama 2 jam untuk memperoleh serbuk HAp.

### 2.3. Fabrikasi Membran dengan Metode *Solvent Casting Molding*

Proses fabrikasi membran dilakukan dengan metode *solvent casting molding* pada cawan petri. Sebanyak 1,88 g PVA dilarutkan ke dalam 50 mL akuades pada  $80^\circ\text{C}$  dan diaduk selama 2 jam hingga larut sempurna. Selanjutnya, 0,65 g PEG ditambahkan secara perlahan ke dalam larutan PVA dan diaduk pada suhu ruang selama 1 jam. Larutan dasar PVA-PEG kemudian ditambahkan serbuk HAp dengan variasi konsentrasi 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5% (b/b terhadap total larutan). Setiap campuran diaduk pada  $60^\circ\text{C}$  selama 1 jam. Larutan akhir dituangkan secara perlahan ke dalam cawan petri kaca untuk proses pencetakan dan dikeringkan dalam oven pada suhu  $75^\circ\text{C}$  selama 24 jam untuk memperoleh membran [4].

### 2.4. Karakterisasi Membran

#### 2.4.1. Uji *Water Uptake*

Pengujian daya serap air dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan membran menyerap air setelah mengalami modifikasi komposisi. Setiap membran dipotong dengan ukuran  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  menggunakan pisau pemotong yang bersih untuk memastikan keseragaman ukuran sampel. Potongan membran kemudian dikeringkan dalam desikator selama minimal 30 menit sebelum penimbangan awal. Sampel yang telah stabil ditimbang menggunakan neraca analitik untuk memperoleh berat kering ( $W_{dry}$ ).

Sampel kering selanjutnya direndam dalam 10 mL akuades di dalam vial tertutup pada suhu ruang. Proses perendaman dilakukan selama 24 jam tanpa pengadukan untuk memastikan air terserap secara difusi alami. Setelah 24 jam, sampel diangkat menggunakan pinset, ditiriskan selama beberapa detik, dan permukaan air berlebih dihilangkan dengan menepuk perlahan menggunakan tisu bebas serat. Sampel kemudian segera ditimbang untuk memperoleh berat basah ( $W_{wet}$ ). Nilai daya serap air dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Water Uptake (\%)} = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100\% \quad (1)$$

$W_{wet}$  adalah massa membran setelah perendaman selama 24 jam (gram), sedangkan  $W_{dry}$  adalah massa membran dalam kondisi kering sebelum direndam (gram). Kedua nilai ini digunakan untuk menghitung persentase daya serap air.

#### 2.4.2. Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Analisis gugus fungsional pada membran dilakukan menggunakan instrumen FTIR Perkin Elmer. Setiap sampel membran dikeringkan terlebih dahulu pada suhu ruang untuk memastikan tidak ada kandungan air bebas yang dapat memengaruhi spektrum. Potongan membran diletakkan padaudukan sampel, kemudian dianalisis dalam rentang bilangan gelombang  $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$  dengan resolusi pemindaian  $4 \text{ cm}^{-1}$ . Setiap sampel dipindai sebanyak 16 kali untuk memperoleh spektrum yang stabil dan mengurangi gangguan sinyal. Data spektrum yang diperoleh digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan gugus fungsional utama, termasuk gugus O-H, C-O, dan gugus fosfat yang mengindikasikan keberadaan hidroksiapatit pada matriks membran. Perbandingan intensitas dan pergeseran puncak digunakan sebagai dasar mendeskripsikan perubahan struktur kimia akibat penambahan HAp.

#### 2.4.3. Analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM)

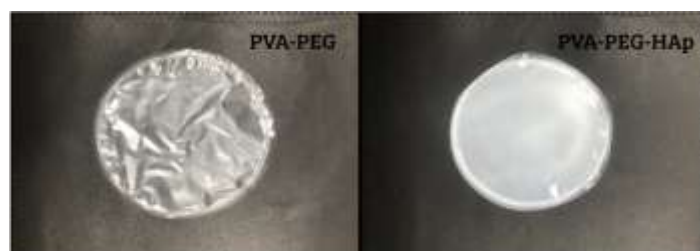
Analisis morfologi permukaan membran dilakukan menggunakan SEM. Sampel membran dipotong berukuran  $\pm 5 \times 5 \text{ mm}$  dengan bantuan pinset pada rendaman *liquid nitrogen*, kemudian dikeringkan pada suhu ruang. Potongan membran ditempelkan pada *aluminum stub* menggunakan *double-sided carbon tape*. Sebelum pengamatan, sampel dilapisi konduktor menggunakan *sputter coater* dengan lapisan emas (Au) selama 60–90 detik pada arus 20–30 mA untuk meningkatkan konduktivitas permukaan. Pengamatan SEM dilakukan pada kondisi vakum tinggi dengan tegangan akselerasi 10–15 kV. Citra diperoleh pada beberapa perbesaran 800x dan

5000x untuk mengevaluasi tekstur permukaan, distribusi pori, dan perubahan morfologi membran akibat penambahan HAp.

### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1. Kenampakan Fisik Membran PVA-PEG-Hap

Perbandingan kenampakan fisik antara membran PVA-PEG tanpa HAp dan membran PVA-PEG-HAp ditunjukkan pada Gambar 1. Membran PVA-PEG murni tampak relatif transparan, tipis, dan menunjukkan pola kerutan halus yang menggambarkan sifat elastis alami dari matriks polimer tanpa penguatan tambahan. Sebaliknya, penambahan HAp menghasilkan membran yang lebih buram dengan warna putih susu, menandakan keberadaan partikel HAp yang terdispersi di dalam matriks polimer. Permukaan membran PVA-PEG-HAp terlihat lebih rata dan tidak berkerut, yang mengindikasikan peningkatan stabilitas mekanik akibat peran HAp sebagai *filler* yang memperkuat jaringan polimer. Namun, seiring bertambahnya konsentrasi HAp, terlihat adanya heterogenitas berupa aglomerasi partikel pada beberapa area permukaan membran. Fenomena ini merupakan karakter umum dari metode *solvent casting molding*, di mana zat *filler* tidak selalu terdispersi secara merata sehingga terjadi pemusatan partikel di titik tertentu.



Gambar 1. Kenampakan Fisik Membran PVA-PEG-HAp 0% dan 1%

Gambar 2 menunjukkan kondisi membran PVA-PEG-HAp ketika diregangkan secara manual. Membran mampu mengalami deformasi elastis tanpa retak atau robek, menunjukkan fleksibilitas dan ketahanan mekanik yang baik. Sifat elastis ini terutama dipengaruhi oleh peran PEG sebagai komponen polimer yang bersifat fleksibel dan hidrofilik. Permukaan yang tetap utuh saat diregangkan mengindikasikan kualitas fabrikasi yang cukup baik serta ikatan antar komponen yang stabil. Karakter ini penting karena membran filtrasi harus fleksibel dan tidak mudah rusak saat proses instalasi maupun selama operasi.



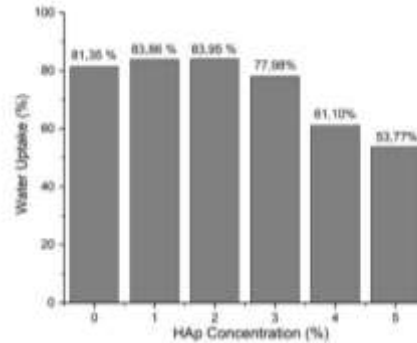
Gambar 2. Kenampakan Membran PVA-PEG-HAp Saat Diregangkan

#### 3.2. Uji Water Uptake

Pengujian *water uptake* dilakukan untuk mengetahui tingkat pengembangan membran akibat penyerapan air. Derajat pengembangan ini mencerminkan interaksi antara polimer PVA-PEG dan *filler* HAp yang mengisi ruang antarmolekul dalam membran. Persentase kenaikan massa setelah perendaman digunakan untuk menggambarkan keteraturan ikatan antara komponen polimer dan HAp dengan air sebagai pelarut. Karena gugus hidroksil pada PVA, PEG, HAp, dan air sama-sama bersifat hidrofilik, nilai *water uptake* dapat digunakan untuk menilai sejauh mana interaksi tersebut terjadi pada struktur membran [14].

Hasil pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa penambahan HAp dari 0% hingga 2% menyebabkan peningkatan nilai *water uptake*. Titik puncak *water uptake* berada pada konsentrasi 2% yaitu sebesar 83,86%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa porositas membran bertambah sehingga air lebih mudah menembus struktur polimer.

Namun, pada konsentrasi 3% hingga 5%, nilai *water uptake* menurun. Penurunan ini menandakan bahwa pori-pori membran menjadi lebih padat akibat distribusi HAp yang semakin besar, sehingga kemampuan mengikat air melemah. Kontribusi kelarutan HAp yang terbatas dalam air juga menyebabkan *filler* cenderung mengisi rongga membran pada konsentrasi tinggi dan menghambat pengembangan membran. Kondisi ini menunjukkan bahwa fleksibilitas PVA–PEG berkurang seiring meningkatnya jumlah HAp, sehingga kemampuan membran untuk mengembang menjadi lebih terbatas.



Gambar 3. Hasil Uji *Water uptake*

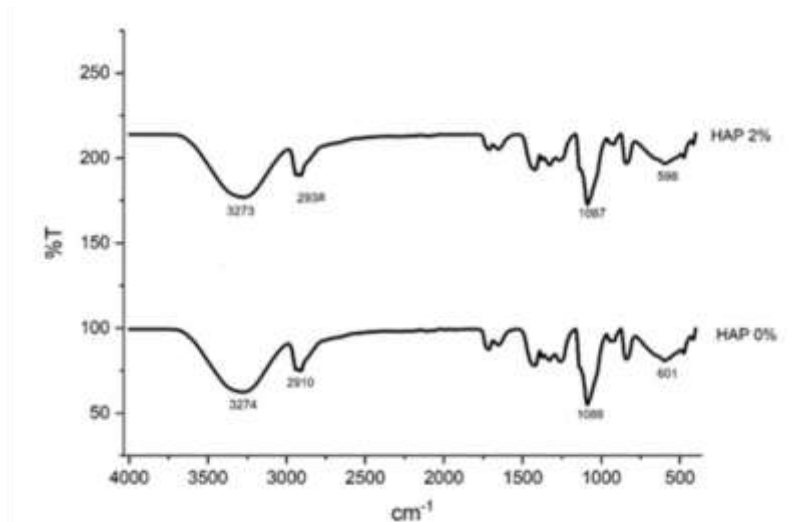
Berdasarkan pola tersebut, konsentrasi 2% dipandang sebagai kondisi optimum penyerapan air karena menunjukkan porositas terbesar yang tercapai tanpa pemadatan struktur. Sebaliknya, konsentrasi tinggi seperti 4% atau 5% menggambarkan kondisi ketika penambahan HAp mulai menghambat pembentukan pori akibat terjadinya pemadatan matriks. Perbedaan respons antar konsentrasi ini menjadi dasar pemilihan sampel untuk karakterisasi lanjutan. Konsentrasi 2% dipilih sebagai sampel utama untuk FTIR karena mewakili kondisi di mana interaksi kimia antara polimer dan HAp diperkirakan paling kuat. Sementara itu, konsentrasi 1% dipilih untuk karakterisasi SEM karena perubahan morfologi awal lebih mudah diamati pada tahap awal penambahan HAp sebelum mencapai kondisi optimum.

### 3.3. Analisis *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Analisis FTIR dilakukan untuk mengetahui perubahan gugus fungsi akibat penambahan HAp, dengan fokus pada membran kontrol (0%) dan membran dengan konsentrasi optimum (2%). Pemilihan kedua sampel ini didasarkan pada hasil *water uptake* yang menunjukkan bahwa konsentrasi 2% merupakan titik di mana interaksi antara polimer dan HAp diperkirakan paling intens. Pada membran tanpa HAp (0%), pita serapan lebar pada rentang 3000–3500  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan vibrasi gugus O–H milik PVA dan PEG. Keberadaan pita C–H pada sekitar 2900–2940  $\text{cm}^{-1}$  menunjukkan vibrasi ulur dari gugus  $-\text{CH}_2-$ , sedangkan pita C–OH pada rentang 1250–1265  $\text{cm}^{-1}$  memperkuat karakteristik penyusun PVA [11], [15].

Pada membran dengan HAp 2%, intensitas pita serapan O–H meningkat. Peningkatan ini mengindikasikan adanya tumpang tindih vibrasi O–H dari HAp dengan gugus hidroksil pada PVA dan PEG [16]. Pola ini sejalan dengan nilai *water uptake* yang tinggi pada konsentrasi 2%, karena interaksi gugus hidroksil yang lebih kuat berkontribusi terhadap kemampuan membran dalam mengikat air. Pita serapan C–H pada sekitar 2900  $\text{cm}^{-1}$  juga menunjukkan peningkatan intensitas *shoulder*, mengindikasikan reorganisasi rantai  $-\text{CH}_2-$  akibat pencampuran dengan *filler*. Keberadaan HAp pada konsentrasi 2% dikonfirmasi melalui pita serapan khas Ca–O pada daerah 1420–1450  $\text{cm}^{-1}$  dan pita fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) pada rentang 475–600  $\text{cm}^{-1}$  serta 1000–1100  $\text{cm}^{-1}$  [17]. Penguatan pada daerah ini menunjukkan bahwa HAp sudah terdispersi di dalam matriks polimer. Adanya sedikit penurunan intensitas salah satu pita fosfat dibandingkan tren teoritis diduga terjadi karena tidak digunakannya agen crosslinker tambahan, sehingga keterikatan HAp belum sepenuhnya stabil.

Selain itu, pita karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) pada sekitar 839–840  $\text{cm}^{-1}$  memperkuat indikasi bahwa HAp yang digunakan merupakan HAp karbonat asal tulang ayam [15]. Gugus karbonat ini berkontribusi pada sifat hidrofilik membran yang tercermin pada nilai *water uptake* yang lebih tinggi. Oleh karena itu, kedua spektrum FTIR ini dianggap paling representatif dalam menggambarkan perubahan kimia akibat penambahan HAp, sesuai dengan tren data *water uptake*.

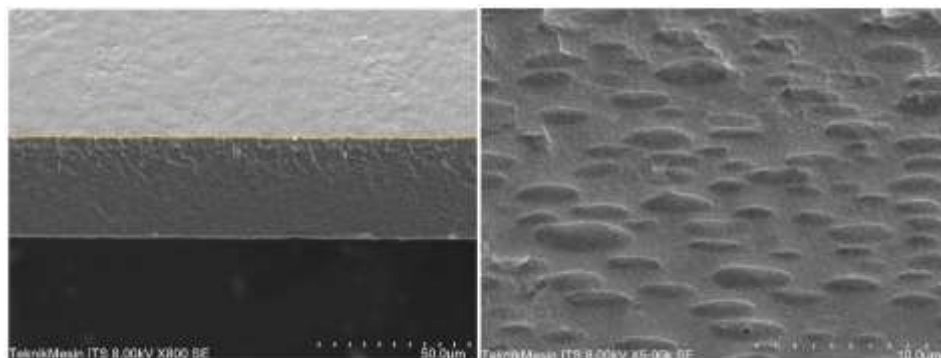


Gambar 4. Visualisasi Spektrum FTIR Membran Komposit PVA-PEG-HAp 0% dan 2%

### 3.4. Analisis Scanning Electron Microscope (SEM)

Analisis morfologi dilakukan untuk mengamati struktur permukaan dan penampang melintang membran PVA–PEG–HAp serta mengidentifikasi perubahan pori akibat penambahan hidroksiapatit. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan SEM dengan perbesaran 800x dan 5000x pada tegangan percepatan 8 kV. Informasi morfologi ini diperlukan karena ukuran dan distribusi pori memengaruhi kelas membran serta performa permeabilitasnya. Berdasarkan hasil uji *water uptake* sebelumnya, diketahui bahwa penambahan HAp meningkatkan kemampuan penyerapan air hingga konsentrasi 2%, yang mengindikasikan peningkatan porositas. Oleh karena itu, konsentrasi 0% dan 1% dipilih untuk analisis SEM sebagai representasi perubahan morfologi pada tahap awal pembentukan pori sebelum mencapai kondisi optimum. Pemilihan kedua sampel ini sesuai dengan interpretasi *water uptake*, di mana konsentrasi rendah menunjukkan tahap awal pembentukan pori dan perubahan morfologi sebelum mencapai kondisi optimum pada 2%. Dengan demikian, pengamatan SEM difokuskan pada representasi evolusi struktur pada tahap awal penambahan HAp.

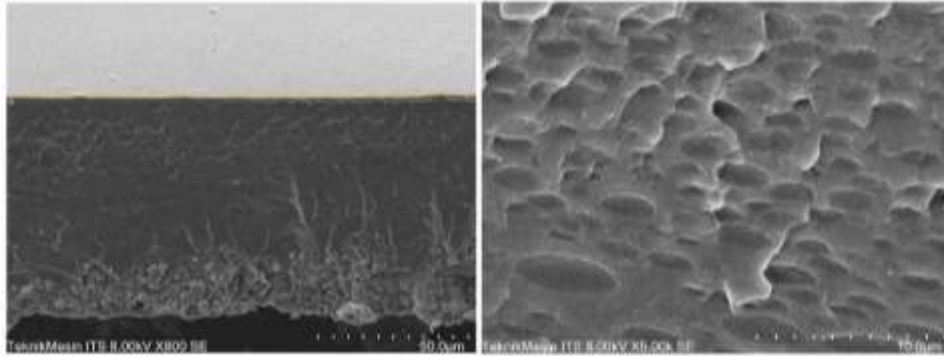
Membran PVA–PEG–HAp 0% menunjukkan struktur yang sangat padat pada bagian penampang melintang. Tidak tampak perkembangan pori yang terdefinisi dengan jelas, sehingga dapat dipastikan bahwa fluida hanya dapat melewati membran ini secara terbatas. Permukaan atas membran tampak halus, homogen, dan tidak menunjukkan adanya rongga atau ruang antar-fase polimer. Struktur yang dense ini sejalan dengan hasil *water uptake* yang rendah pada membran tanpa HAp serta mencerminkan tidak adanya gangguan pada matriks PVA–PEG yang dapat membentuk pori.



Gambar 5. Morfologi Penampang Lintang dan Permukaan Atas Membran PVA-PEG-HAp 0%

Pada membran PVA–PEG–HAp 1%, perubahan morfologi mulai terlihat. Penampang melintang masih menunjukkan kecenderungan struktur dense, tetapi permukaan atas menunjukkan peningkatan kekasaran. Agregat HAp tampak terdistribusi pada permukaan dan berperan sebagai titik pembentuk pori. Ukuran pori lebih

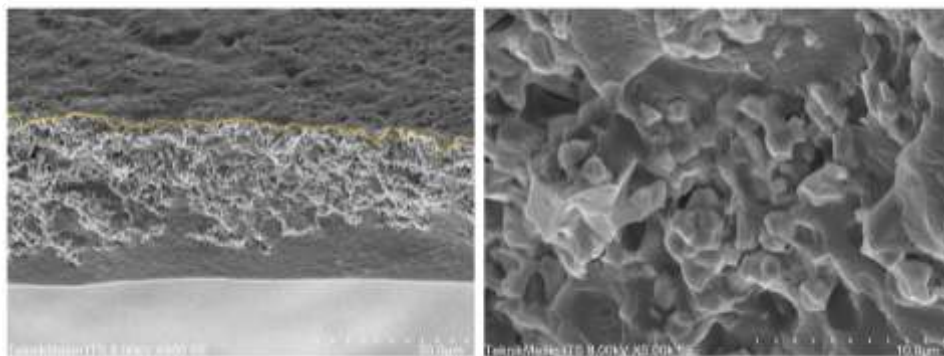
jelas dibandingkan membran kontrol, dan beberapa pori tampak saling terkoneksi. Analisis dengan perangkat lunak ImageJ menunjukkan rata-rata diameter pori sebesar  $1,46 \mu\text{m}$ , yang mengindikasikan bahwa membran ini masuk dalam kategori microfiltration. Kehadiran HAp sebagai *filler* menyebabkan terbentuknya ruang di antara rantai PVA-PEG, sehingga meningkatkan permeabilitas tanpa merusak struktur matriks secara signifikan. Perubahan ini konsisten dengan peningkatan nilai *water uptake* pada konsentrasi rendah serta diperkuat oleh karakteristik FTIR yang menunjukkan interaksi gugus O-H dari HAp dengan polimer.



Gambar 6. Morfologi Penampang Lintang dan Permukaan Atas Membran PVA-PEG-HAp 1%

Gambar 7 menunjukkan hasil analisis SEM pada membran PVA-PEG-HAp dengan konsentrasi HAp 3%. Pada bagian penampang melintang, struktur membran tampak tetap dominan padat dengan tingkat kerapatan yang lebih tinggi dibandingkan membran 1%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sebagian ruang antar-rantai polimer mulai terisi oleh partikel HAp sehingga perkembangan pori semakin terbatas dan aliran fluida melalui volume membran menjadi lebih sulit. Permukaan atas membran menunjukkan perubahan morfologi yang lebih nyata. Kekasaran permukaan meningkat secara signifikan, ditandai dengan munculnya agregat HAp berukuran granular yang terdistribusi tidak merata. Pori-pori yang terbentuk tampak bervariasi dalam ukuran dan tidak seragam, di mana sebagian pori mulai melebar, sementara pori lainnya tertutup oleh aglomerasi partikel HAp. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi 3%, HAp mulai mengalami keterbatasan dalam proses dispersi sehingga beberapa partikel saling beraglomerasi dan menutupi sebagian area permukaan membran. Dengan kata lain, pada konsentrasi 3% ini juga menurunkan hidrofilisitas membran.

Kondisi tersebut berkaitan erat dengan teknik fabrikasi *solvent casting molding*, di mana proses penguapan pelarut dapat menyebabkan partikel *filler* yang berukuran lebih besar atau kurang terdispersi mengendap pada zona tertentu. Hasil analisis menunjukkan bahwa rerata diameter pori mencapai sekitar  $9,52 \mu\text{m}$ , jauh lebih besar dibandingkan membran 1%. Namun demikian, peningkatan ukuran pori ini tidak sepenuhnya mencerminkan peningkatan porositas karena ketidakteraturan distribusi pori dan keberadaan aglomerat yang menghambat pembentukan jalur pori yang seragam. Secara keseluruhan, morfologi pada konsentrasi 3% menggambarkan tahap awal terjadinya pepadatan matriks dan gangguan struktur akibat kelebihan HAp. Temuan ini konsisten dengan penurunan nilai *water uptake* pada konsentrasi di atas titik optimum 2%, di mana aglomerasi *filler* menyebabkan penurunan kemampuan membran untuk mengembang dan mengikat air.



Gambar 7. Morfologi Penampang Lintang dan Permukaan Atas Membran PVA-PEG-HAp 3%

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa efektivitas HAp sebagai *filler* hanya optimal pada rentang konsentrasi rendah ( $\leq 2\%$  HAp), ketika partikel masih mampu terdispersi secara relatif homogen dan berperan mendorong pembentukan pori. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, interaksi yang tidak stabil serta kecenderungan partikel untuk beragregasi justru menyebabkan pemadatan lokal dan ketidakteraturan struktur. Dengan demikian, kombinasi hasil *water uptake*, FTIR, dan SEM secara konsisten menunjukkan bahwa penambahan HAp memberikan manfaat struktural yang signifikan pada konsentrasi rendah, sedangkan penambahan berlebih cenderung menurunkan homogenitas dan kualitas morfologi membran PVA-PEG.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa hidroksiapatit yang diperoleh dari limbah tulang ayam dapat digunakan sebagai *filler* dalam membran komposit berbasis PVA-PEG dan mampu memengaruhi sifat fisikokimia membran secara signifikan. Variasi konsentrasi HAp memberikan perubahan yang jelas pada daya serap air, karakteristik gugus fungsional, dan morfologi membran. Konsentrasi rendah hingga menengah menghasilkan peningkatan porositas dan interaksi gugus hidroksil yang lebih kuat, dengan kondisi optimum tercapai pada penambahan HAp sebesar 2%. Pada konsentrasi ini, struktur membran menjadi lebih terbuka dan kemampuan menyerap air meningkat tanpa menimbulkan pemadatan yang berlebihan. Sebaliknya, penambahan HAp di atas 2% menyebabkan aglomerasi partikel yang menurunkan homogenitas struktur, memperbesar ketidakteraturan pori, serta mengurangi hidrofilisitas membran. Secara keseluruhan, hasil penelitian mengindikasikan bahwa HAp alami dari limbah tulang ayam berpotensi menjadi material penguat ramah lingkungan dalam pembuatan membran komposit, terutama pada aplikasi yang memerlukan peningkatan porositas dan karakteristik interaksi antarmolekul. Aplikasi lebih lanjut dapat diarahkan pada *pre-treatment* air, pemisahan berbasis mikrofiltrasi, atau sebagai material dasar untuk membran biokeramik. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi pengaruh agen *crosslinker* terhadap stabilitas ikatan polimer-Hap dan menganalisis sifat mekanik secara lebih komprehensif, serta memperluas karakterisasi performa membran pada kondisi operasi sebenarnya. Hasil ini diharapkan dapat menjadi fondasi bagi pemanfaatan limbah sebagai alternatif material fungsional dalam teknologi membran yang lebih berkelanjutan.

#### Pengakuan

Penelitian ini didukung oleh pendanaan dari Program Bantuan Penelitian Mahasiswa Tahun Anggaran 2025, Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM), UPN "Veteran" Yogyakarta, berdasarkan surat pengumuman penerima hibah nomor 246/UN.62.21/PG.01.00/2025. Penulis menyampaikan apresiasi kepada LPPM atas fasilitas pendanaan dan dukungan administratif yang diberikan selama pelaksanaan penelitian.

#### Referensi

1. P. Vijayaraghavan *et al.*, "Preparation and antibacterial application of hydroxyapatite doped Silver nanoparticles derived from chicken bone," *J King Saud Univ Sci*, vol. 34, no. 2, p. 101749, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jksus.2021.101749.
2. M. Maulina *et al.*, "PEMANFAATAN TULANG AYAM SEBAGAI ADSORBEN METHYLENE BLUE," *Jurnal Zarah*, vol. 10, no. 2, pp. 73–79, Nov. 2022, doi: 10.31629/zarah.v10i2.3980.
3. M. A. El-Khateeb, H. M. Ahmed, and N. A. Sobhy, "Recycling of waste chicken bones for greywater pollutants removal," *Desalination Water Treat.*, vol. 265, pp. 124–133, Jul. 2022, doi: 10.5004/dwt.2022.28609.
4. Sankar Rajan, K. Marimuthu, C. B. Ayyanar, and M. E. Hoque, "Development and in-vitro characterization of HAP blended PVA/PEG bio-membrane," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 18, pp. 4956–4964, May 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.04.130.
5. M. Ouda, Y. Ibrahim, P. Kallem, B. Govindan, F. Banat, and S. W. Hasan, "Highly permeable, environmentally-friendly, antifouling poly(lactic acid)-hydroxyapatite/polydopamine (PLA-HAp/PDA) ultrafiltration membranes," *J Clean Prod.*, vol. 330, p. 129871, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129871.
6. H. Wang *et al.*, "Membrane-based technology in water and resources recovery from the perspective of water social circulation: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 908, p. 168277, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168277.
7. Nabella, K. L. Ikawati, D. E. C. Jaya, R. A. Nida, and H. S. Kusuma, "A bibliometric study of published article on electro dialysis utilizing the Scopus database (1993–2023)," *Science Talks*, vol. 11, p. 100370, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.sctalk.2024.100370.
8. A. Sahu, R. Dosi, C. Kwiatkowski, S. Schmal, and J. C. Poler, "Advanced Polymeric Nanocomposite Membranes for Water and Wastewater Treatment: A Comprehensive Review," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 3, p. 540, Jan. 2023, doi: 10.3390/polym15030540.
9. P. Veisi, A. Fattah-alhosseini, and M. Kaseem, "Recent advances in flat sheet mixed matrix membrane modified by Mg-based layered double hydroxides (LDHs) for salt and organic compound separations," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 12, no. 6, pp. 2182–2200, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.jma.2024.06.002.
10. C. Ravindran, A. Panayam Parambil Kunnathulli, and J. Kunhikrishnan Maniath, "Polyvinyl alcohol-polyvinylpyrrolidone-hydroxy apatite (PVA-PVP-Hap) membrane for effective removal of benzene from aqueous solutions:-Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies," *Mater Today Proc.*, vol. 66, pp. 2422–2430, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.340.

11. S. A. Ambarwati, N. A. Hidayati, and H. P. Hutapea, "SINTESIS MEMBRAN KITOSAN/POLI VINIL ALKOHOL (PVA) UNTUK MENURUNKAN KADAR LIMBAH PEWARNA TEKSTIL," *Dalton : Jurnal Pendidikan Kimia dan Ilmu Kimia*, vol. 7, no. 1, p. 75, Apr. 2024, doi: 10.31602/dl.v7i1.14360.
12. V. A. Markelov, K. V. Danilko, V. A. Solntsev, S. V. Pyatnitskaya, and A. R. Bilyalov, "Application of Hydroxyapatite Obtained by Different Techniques: Metabolism and Microarchitecture Characteristics (Review)," *Sovremennye tehnologii v medicine*, vol. 16, no. 6, p. 60, Dec. 2024, doi: 10.17691/stm2024.16.6.06.
13. P. O. Etinosa *et al.*, "In-depth review of synthesis of hydroxyapatite biomaterials from natural resources and chemical reagents for biomedical applications," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 17, no. 12, p. 106010, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.arabjc.2024.106010.
14. M. Noruzi, P. Hadian, L. Soleimanpour, L. Ma'mani, and K. Shahbazi, "Hydroxyapatite nanoparticles: an alternative to conventional phosphorus fertilizers in acidic culture media," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 10, no. 1, p. 71, Aug. 2023, doi: 10.1186/s40538-023-00437-0.
15. W. Andinnawati and M. F. Hakim, "PENGARUH VARIASI KONSENTRASI KONSENTRASI SiO<sub>2</sub> TERHADAP KARAKTERISASI MEMBRAN MIKROFILTRASI," *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, vol. 13, no. 1, pp. 1–10, May 2024, doi: 10.29103/jtku.v13i1.15584.
16. A. Y. Yassin, A. M. Abdelghany, R. S. Salama, and A. E. Tarabiah, "Structural, Optical and Antibacterial Activity Studies on CMC/PVA Blend Filled with Three Different Types of Green Synthesized ZnO Nanoparticles," *J Inorg Organomet Polym Mater*, vol. 33, no. 7, pp. 1855–1867, Jul. 2023, doi: 10.1007/s10904-023-02622-y.
17. M. Noruzi, P. Hadian, L. Soleimanpour, L. Ma'mani, and K. Shahbazi, "Hydroxyapatite nanoparticles: an alternative to conventional phosphorus fertilizers in acidic culture media," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 10, no. 1, p. 71, Aug. 2023, doi: 10.1186/s40538-023-00437-0.