



ULTRAPARTIKEL TULANG IKAN KAYA KALSIUM UNTUK PENINGKATAN GEL SURIMI PADA PEMANASAN GELOMBANG MIKRO

**Bambang Riyanto^{1*}, Wahyu Ramadhan^{1,2}, Wini Trilaksani¹,
Cahyuning Isnaini¹, Ayu Septi Wulandari¹**

¹Departemen Teknologi Hasil Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University
Jalan Agatis Kampus IPB Dramaga, Bogor, Jawa Barat Indonesia 16680

²Pusat Kajian Sumberdaya Pesisir dan Lautan (PKSPL), Kampus IPB Baranangsiang
Jalan Raya Pajajaran No. 1, Bogor, Jawa Barat Indonesia 16127

Diterima: 2 November 2024/Disetujui: 24 Desember 2024

*Korespondensi: bambangriyanto@apps.ipb.ac.id

Cara sitasi (APA Style 7th): Riyanto, B., Ramadhan, W., Trilaksani, W., Isnaini, C., & Wulandari, A. S. (2024). Ultrapartikel tulang ikan kaya kalsium untuk peningkatan gel surimi pada pemanasan gelombang mikro. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 27(12), 1195-1210. <http://dx.doi.org/10.17844/jphpi.v27i12.60145>

Abstrak

Produk berbasis surimi memerlukan kekuatan gel yang optimal untuk menghasilkan tekstur yang diinginkan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi terbaik ultrapartikel tulang ikan kaya kalsium (UpTIK) pada surimi ikan kurisi berdasarkan kekuatan gel surimi dan aktivitas TGase endogen pada pemanasan gelombang mikro. UpTIK diperoleh melalui kalsinasi dan *nano milling*, yang menghasilkan komposisi kalsium yang tinggi. Aktivasi TGase endogen dilakukan dengan variasi konsentrasi UpTIK (0; 0,5; 1; dan 2%) pada surimi dengan pemanasan gelombang mikro. Parameter yang dianalisis meliputi aktivitas ekstrak enzim TGase endogen, analisis warna $L^*a^*b^*$ dan derajat putih, daya ikat air/*water holding capacity* (WHC), protein larut garam (PLG), dan kekuatan gel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi 1% UpTIK memberikan aktivitas TGase tertinggi ($0,47 \pm 0,05$ U/mL) dan kekuatan gel terbaik ($647,17$ g/cm²). Penambahan UpTIK meningkatkan daya ikat air dan protein larut garam tanpa memengaruhi derajat putih surimi. Waktu pemanasan gelombang mikro meningkatkan efisiensi hingga tiga kali lebih cepat dari pemanasan konvensional. Penelitian ini menawarkan inovasi pemanfaatan UpTIK untuk mengaktifkan TGase endogen pada pemanasan gelombang mikro sehingga memberikan potensi diversifikasi baru produk surimi berbasis perikanan tropis.

Kata kunci: cetak 3-D, gelombang mikro, gizi, ikan tropis, transglutaminase

Calcium-Rich Fish Bone Ultraparticles for Enhancing Surimi Gel Strength under Microwave Heating

Abstract

Achieving optimal gel strength is critical for ensuring the desired texture in surimi-based products. This study aims to determine the best concentration of calcium-rich fish bone ultraparticles (UpTIK) in surimi of threadfin bream fish based on the gel strength of surimi and endogenous TGase activity upon microwave heating. UpTIK was produced through calcination and nano-milling, resulting in a high calcium content. Microwave heating was applied with varying concentrations of UpTIK (0; 0.5; 1; and 2%). The parameters analyzed included the activity of endogenous TGase enzyme extract, $L^*a^*b^*$ color analysis and whiteness, water holding capacity (WHC), salt-soluble protein (PLG), and gel strength. The results indicated that a 1% UpTIK concentration achieved the highest TGase activity (0.47 ± 0.05 U/mL) and gel strength (647.17 g/cm²). Additionally, the inclusion of UpTIK improved water holding capacity and salt-soluble

protein content while preserving the whiteness of the surimi. Microwave heating also significantly reduced processing time by up to threefold compared to conventional heating. This study demonstrated a novel approach for activating endogenous TGase using UpTIK under microwave heating, providing a promising strategy for diversifying surimi products derived from tropical fisheries.

Keywords: microwave, nutrition, transglutaminase, tropical fish, 3D printing

PENDAHULUAN

Bakso ikan, kamaboko, dan *crab stick* (*kanikama*) merupakan produk berbasis surimi yang makin diminati masyarakat karena teksturnya yang unik dan gizinya yang tinggi. Kekuatan gel merupakan atribut utama, yang terbentuk melalui denaturasi termal protein melalui dua tahap pemanasan klasik, yaitu suhu 40°C selama 30–60 menit, diikuti suhu 80–90°C selama 20–30 menit (Zhu *et al.*, 2024). Pemanasan pertama pada suhu rendah disebut “*setting*” (0–40°C), yang memperkuat tekstur pasta surimi (*suwari*) melalui aktivasi transglutaminase (TGase) endogen, sementara pemanasan kedua pada suhu tinggi (*honkanetsu*) membentuk gel elastis. Struktur gel dapat terdegradasi akibat aktivitas enzim proteolitik, terutama katepsin pada suhu 50–70°C, yang disebut *gel-cracking* atau *modori*.

Perkembangan teknologi pencetakan makanan 3D memungkinkan diversifikasi produk surimi yang lebih luas, melampaui batasan pengolahan konvensional (Yang *et al.*, 2024a). Pemanasan gelombang mikro (*microwave heating*) mulai dikembangkan dalam pengolahan surimi karena menawarkan transfer panas lebih cepat, waktu pemanasan singkat, dan efisiensi termal yang tinggi (Zhao *et al.*, 2021). Surimi yang dipanaskan dengan gelombang mikro dapat mencapai suhu 90–100°C dalam waktu 3 menit sehingga metode ini mampu meningkatkan fleksibilitas struktur TGase endogen dan memodifikasi struktur protein miofibril, serta memengaruhi aktivitas enzim proteolitik (Jiao *et al.*, 2023). Proses pemanasan ini bergantung pada interaksi antar-komponen bahan, yang memicu gesekan antar molekul untuk menghasilkan panas sehingga surimi, yang kaya akan air dan garam, sangat cocok karena memiliki respons dielektrik yang tinggi (Cao *et al.*, 2019).

Proses pembentukan gel surimi berkaitan erat dengan ikatan silang pada rantai myosin, yang dikatalisis oleh TGase endogen

dengan bantuan kalsium yang terdapat alami dalam surimi (Xie *et al.*, 2024). Sumber kalsium salah satunya tepung tulang ikan telah terbukti efektif untuk mengaktifkan TGase endogen, meningkatkan ikatan kovalen antar-protein, dan memperkuat gel surimi (Yin & Park, 2015). Partikel tulang ikan berukuran besar (>600 µm) sulit terintegrasi dalam jaringan gel sehingga penambahan partikel tulang mikro dan nano menjadi lebih efektif untuk meningkatkan kekuatan gel melalui pelepasan ion kalsium yang mengaktifkan ikatan silang (Nawaz *et al.*, 2019). Yin *et al.* (2017) melaporkan bahwa makin kecil ukuran partikel tulang ikan, makin baik tekstur, derajat putih, dan kapasitas menahan air dari surimi. Perkembangan terbaru oleh Wei *et al.* (2024) menunjukkan bahwa penambahan ultrapartikel tulang ikan dengan ukuran 50 nm hingga 5 µm pada surimi, ideal untuk mencegah terjadinya penyumbatan *nozzle printer 3D*, meningkatkan stabilitas termal dan ketepatan bentuk dalam pencetakan 3D sehingga membuka peluang untuk menghasilkan produk surimi cetak dengan kualitas tinggi.

Pengaruh kalsium terhadap aktivitas TGase dalam pemanasan gelombang mikro masih belum banyak dieksplorasi meskipun pemanfaatan kalsium untuk aktivasi TGase telah terbukti efektif melalui pemanasan konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi terbaik ultrapartikel tulang ikan kaya kalsium (UpTIK) pada surimi ikan kurisi berdasarkan kekuatan gel surimi dan aktivitas TGase endogen pada pemanasan gelombang mikro. Transisi fase surimi dari fluida ke gel padat dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pencetakan 3D surimi. Penelitian ini diharapkan dapat memberi kontribusi inovatif dalam meningkatkan kualitas surimi dari ikan tropis dan efisiensi industri perikanan budi daya di Indonesia melalui pemanfaatan hasil samping tulang ikan patin.



BAHAN DAN METODE

Mutu Bahan Baku Ikan Kurisi

Ikan kurisi (*Nemipterus* sp.) segar diperoleh dari pedagang pengumpul di Pasar ikan Muara Angke, Jakarta yang berasal dari Tempat Pendaratan Ikan Indramayu, Jawa Barat. Ikan ditransportasikan selama 3 jam ke Cilebut, Kabupaten Bogor, dan diterima setelah 6 jam di Laboratorium Departemen Teknologi Hasil Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB Dramaga, Bogor. Selama transportasi, ikan diberikan es dan disimpan dalam kotak styrofoam.

Kesegaran ikan kurisi ditentukan secara sensori berdasarkan SNI 2729:2021 mengenai ikan segar, dengan persyaratan minimum nilai 7 untuk parameter penampilan, warna, bau, dan tekstur. Pengujian sensori dilakukan sesuai pedoman dalam SNI 2346:2015 mengenai metode pengujian sensori pada produk perikanan, dengan melibatkan 30 panelis tidak terlatih. Penilaian kesegaran secara kimia dilakukan melalui pengukuran nilai *Total Volatile Base Nitrogen* (TVB-N) yang mengacu SNI 01-2354.8:2009. Karakteristik kimia dianalisis melalui uji proksimat sesuai metode AOAC (2005), yaitu kadar air (metode gravimetri), abu (pengabuan kering), protein (Kjeldahl), lipid (metode Soxhlet), dan karbohidrat (dihitung secara *by difference*).

Pembuatan dan Penentuan Karakteristik Surimi Ikan Kurisi

Pembuatan surimi mengacu pada SNI 2694:2021 tentang surimi beku, dengan modifikasi pada proses pencucian (*leaching*) yang dilakukan satu kali sesuai Song *et al.* (2024) serta modifikasi tanpa penambahan garam dan krioprotektan, dan tidak ada tahapan pembentukan, pembekuan cepat, dan penyimpanan beku. Pembuatan surimi dimulai dengan preparasi, meliputi pembuatan filet dan pemisahan kulit ikan (*skinless*), serta pelumatan daging ikan. Daging lumat dicuci satu kali selama 20 menit pada suhu 10°C menggunakan akuades yang dicampur dengan es, dengan perbandingan air terhadap daging ikan 4:1. Setelah pencucian, air dipisahkan melalui proses pemerasan (*straining*). Surimi dilakukan analisis rendemen, *water holding*

capacity, protein larut garam, analisis warna, nilai pH, kekuatan gel surimi, dan uji sensori.

Rendemen (*yield*) surimi dihitung berdasarkan berat produk akhir dibandingkan berat bahan baku ikan kurisi. Daya ikat air (*Water Holding Capacity*, WHC) surimi diuji sesuai metode Tolano-Villaverde *et al.* (2016) melalui pemisahan cairan menggunakan *high-speed refrigerated centrifuge* HIMAC CR 21G (Eppendorf Himac Technologies Co., Ltd., Ibaraki, Jepang) pada kecepatan 5.000 ×g selama 15 menit. Protein larut garam (PLG) surimi dianalisis sesuai metode Wang *et al.* (2023b) menggunakan 50 mL larutan NaCl 5% dan disentrifugasi pada 3.400 xg selama 30 menit. Kandungan protein dalam supernatan dihitung menggunakan metode semi-mikro Kjeldahl. Analisis warna surimi mengacu Meng *et al.* (2021) menggunakan *color analyzer* Lutron RGB10002 (Lutron Electronics Co. Inc., AS) untuk menentukan nilai L*, a*, b*, dan derajat putih. Nilai pH diukur mengacu penelitian Kang *et al.* (2021) menggunakan pH meter digital (FE-28, Mettler Toledo, Swiss).

Analisis Kekuatan Gel Surimi

Pengujian kekuatan gel surimi ikan kurisi mengacu pada metode Yang *et al.* (2020) yang dilakukan dengan kondisi sampel surimi tanpa penambahan bahan lain, termasuk garam dan pencetakan menggunakan *casing stainless*. Kekuatan gel surimi diukur menggunakan *texture analyzer* (TA-XT2i, Stable Micro Systems, UK). Sampel berbentuk silinder (tinggi 2 cm, radius 1 cm) dipes dengan menekan secara tegak lurus menggunakan gaya 5 N melalui *probe* berbentuk bola (diameter 5 mm, P/0.25 S) pada kecepatan 1 mm/s sejauh 2 cm.

Analisis Sensori Surimi

Uji sensori surimi ikan kurisi dilakukan untuk menilai kualitas lipat dan gigit produk, dengan melibatkan 30 panelis tidak terlatih sesuai SNI 2346:2015. Uji lipat dilakukan dengan menjepit sampel di antara ibu jari dan jari telunjuk hingga membentuk setengah lingkaran. Penilaian uji lipat terbagi menjadi beberapa kategori: *grade* AA (tidak retak

saat dilipat dua kali, skor 9), *grade A* (tidak retak saat dilipat satu kali, skor 7), *grade B* (sedikit retak saat dilipat satu kali, skor 5), *grade C* (retak saat dilipat satu kali, skor 3), dan *grade D* (hancur saat ditekan dengan jari, skor 1). Sementara itu, uji gigit dilakukan dengan menggigit sampel menggunakan gigi seri atau di beberapa titik. Penilaian uji gigit menggunakan skala 9 (sangat keras) hingga 1 (hancur), sesuai standar sensori.

Pembuatan Ultrapartikel Tulang Ikan Kaya Kalsium (UpTIK) (Modifikasi dari Yin *et al.*, 2017)

Pembuatan UpTIK dimulai dengan perebusan tulang ikan patin pada suhu 100°C selama 60 menit, dibersihkan dari sisa daging dan dicuci menggunakan akuades. Pemasakan dengan autoklaf (All American Autoclave Sterilizers, AS) dilakukan pada suhu 121°C dengan tekanan 15 psi selama 2 jam. Setelah itu, tulang ikan dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 2 jam. Tulang ikan kering yang dihasilkan kemudian dihaluskan menggunakan *hammer mill* (Thomas Scientific Laboratory Mill, AS) selama 30 menit hingga lolos ayakan dengan ukuran 60 *mesh*. Selanjutnya, dilakukan kalsinasi menggunakan tanur listrik (Yamato Muffle Furnace FM 38) dengan laju pemanasan 2°C/menit hingga mencapai suhu 800°C, yang berlangsung selama 5 jam. Pemanasan dilakukan secara bertahap dari suhu kamar hingga suhu kalsinasi 800°C dengan laju pemanasan yang konsisten. Setelah kalsinasi, dihaluskan menjadi UpTIK menggunakan *nano milling* (FRITSCH - premium line milling test) selama 1 jam pada kecepatan 4.500 rpm, sesuai dengan modifikasi Zhang *et al.* (2017) dan Riyanto *et al.* (2024). UpTIK yang dihasilkan ini kemudian dikemas dalam wadah gelas dan disimpan pada suhu ruangan untuk keperluan analisis.

Analisis karakteristik UpTIK mencakup kadar abu dengan metode pengabuan kering berdasarkan AOAC (2005), kadar kalsium UpTIK mengacu Yin *et al.* (2016) menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) dengan perangkat *Perkin Elmer Atomic Absorption Spectroscopy* Pin AAde 900 H (Perkin Elmer, MA, AS).

Kadar fosfor UpTIK mengacu pada Savlak *et al.* (2020) dianalisis menggunakan HACH DR/2000 Direct Reading Spectrophotometer (Hach, Iowa, AS). Mikrostruktur dan komposisi unsur kimia UpTIK mengacu Yin *et al.* (2016) dievaluasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) model JEOL JSM 6510 LA (JEOL Ltd., Tokyo, Jepang). Analisis gugus fungsi UpTIK mengacu Zhu *et al.* (2024) dengan *Fourier Transform InfraRed (FTIR) spectroscopy* menggunakan Tensor 37 (Bruker) (Thermo Fisher Scientific Inc., MA, AS), dengan sampel yang disiapkan sebagai pelet KBr dalam rentang bilangan gelombang antara 4.000 hingga 400 cm^{-1} . Derajat kristalinitas UpTIK mengacu Zhu *et al.* (2024) ditentukan menggunakan *X-Ray Diffractometer* (X-RD) model Rigaku Tipe SmartLab 3 kW.

Penentuan Karakteristik Surimi Ikan Kurisi melalui Aktivasi TGase Endogen dengan Ultrapartikel Tulang Ikan Kaya Kalsium pada Pemanasan Gelombang Mikro (Yang *et al.*, 2024b)

UpTIK disiapkan dengan melarutkan dalam air dingin konsentrasi 30% (b/v) selama 30 menit. Aktivasi enzim TGase endogen dilakukan dengan penambahan UpTIK pada konsentrasi 0; 0,5; 1; dan 2% dari total berat. Aktivitas enzim TGase endogen, yang berperan dalam pembentukan ikatan silang antar protein pada surimi, diukur menggunakan *cross-linking assay*. N,N-dimethyl cadaverine (DMC) digunakan sebagai donor amina, sedangkan *monodansyl cadaverine* (MDC) 15 μM digunakan sebagai substrat fluoresen. Ekstraksi TGase endogen dilakukan dengan menyiapkan bufer Tris-HCl 50 mM (pH 7,5), dilanjutkan dengan sentrifugasi untuk memperoleh fraksi supernatan yang mengandung enzim. Reaksi berlangsung pada suhu 37°C, yang mana TGase endogen mengkatalisis pembentukan ikatan silang MDC pada protein target, yang menghasilkan sinyal fluoresen. Intensitas fluoresensi diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang eksitasi 330 nm dan emisi 465 nm (Huang *et al.*, 2023). Serapan



gelombang gugus fungsi aktivasi enzim TGase endogen dianalisis menggunakan *FTIR Spectroscopy* (Zhu *et al.*, 2024).

Proses pencampuran UpTIK pada surimi menggunakan *food processor* pada kecepatan 1.900 rpm selama 2 menit. Pemanasan gelombang mikro (*microwave heater*) dilakukan menggunakan *microwave oven* merk KRIS (Krisbow, Cina), dan untuk melihat tingkat kesesuaian dilakukan pemanasan konvensional menggunakan *B-ONE Digital Water Bath DWB 18L 2R 6H* (MIULAB, Hangzhou, China). Prosedur pemanasan mengacu Yang *et al.* (2020) dengan pengukuran suhu menggunakan *thermometer digital infrared (thermogun)* (Shenzhen Xrc Electronics Co., Ltd., Guangdong, China), dan fluktuasi suhu yang diizinkan adalah $\pm 1^{\circ}\text{C}$ dari suhu yang ditetapkan untuk pemanas gelombang mikro, mengacu pada Wang *et al.* (2023a). Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk pola perubahan suhu terhadap waktu.

Mutu surimi ikan kurisi melalui aktivasi enzim TGase endogen dengan UpTIK selama pemanasan gelombang mikro meliputi analisis warna $L^*a^*b^*$ dan derajat putih (Meng *et al.*, 2021), daya ikat air (*water holding capacity*, WHC) (Tolano-Villaverde *et al.*, 2016), protein larut garam (PLG) (Wang *et al.*, 2023b), dan kekuatan gel (Yang *et al.*, 2020).

Analisis Data

Rancangan percobaan yang digunakan adalah acak lengkap dengan faktor perlakuan aktivasi enzim TGase endogen menggunakan UpTIK 0; 0,5; 1; dan 2% pada pemanasan *microwave*. Penelitian dilakukan tiga ulangan, dan data dinyatakan sebagai nilai rata-rata \pm simpangan baku. Data dilakukan analisis ragam (ANOVA) dengan perangkat lunak SPSS 22.0 (Chicago, IL, USA). Perbedaan signifikan antar perlakuan ditentukan melalui uji perbandingan berganda Duncan dengan tingkat kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Surimi dari Ikan Kurisi

Ikan kurisi secara visual berbentuk pipih dengan ketebalan $1,6 \pm 0,2$ cm dan panjang $13,55 \pm 0,59$ cm. Warna tubuh

bagian atas merah muda, sementara bagian bawahnya keperakan. Sirip punggung tampak keputihan, sedangkan sirip dada dan ekor memiliki semburat merah muda. Proporsi terbesar tubuh ikan adalah bagian daging, yakni $41,73 \pm 3,21\%$, yang merupakan bagian dapat dimakan (*edible portion*) dan sangat layak sebagai bahan baku surimi.

Penilaian sensori ikan kurisi menunjukkan nilai kesegaran rata-rata 7,32, yang menempatkan ikan dalam kategori segar sesuai dengan SNI 2729:2021 mengenai ikan segar. Nilai ini memenuhi persyaratan minimum 7 pada setiap parameter kesegaran, termasuk penampilan, warna, bau, dan tekstur. Berdasarkan pengukuran TVB-N, ikan kurisi yang digunakan memiliki nilai 16,99 mg N/100 g. Menurut SNI 01-2354.8:2009, ikan dengan nilai TVB-N antara 10 hingga 20 mg N/100 g dikategorikan sebagai ikan segar. Umumnya, nilai TVB-N sebesar 13 mg/100 g digunakan sebagai batas atas penerimaan ikan segar, sementara nilai 20 mg/100 g menandakan ikan sudah tidak layak konsumsi. Berdasarkan nilai TVB-N, dapat diperkirakan bahwa ikan kurisi masih dalam kondisi baik, telah ditangani dengan pemberian es, dan disimpan kurang dari 7 hari (*Figure 1a*). Komposisi kimia ikan kurisi mencakup kadar air sebesar $79,01 \pm 0,1\%$, protein $19,28 \pm 0,28\%$, lemak $0,40 \pm 0,15\%$, abu $0,93 \pm 0,02\%$, dan karbohidrat (*by difference*) $0,38 \pm 0,18\%$. Kandungan protein yang tinggi pada ikan kurisi segar menunjukkan potensinya sebagai bahan baku surimi. Keberadaan protein myofibrillar, akan dapat memberikan kontribusi terhadap kekuatan gel dari surimi.

Rendemen (*yield*) surimi dari ikan kurisi sebesar $28,94 \pm 0,56\%$ dari bobot awal ikan. Nilai warna menunjukkan tingkat kecerahan (*Lightness/L**) sebesar $84,75 \pm 1,37$, kemerahan (*Redness/a**) sebesar $-1,59 \pm 2,14$, dan kekuningan (*Yellowness/b**) sebesar $16,98 \pm 4,01$, dengan derajat putih mencapai $76,86 \pm 0,19$ sesuai dengan *Figure 1b*. Nilai pH adalah $6,65 \pm 0,02$, daya ikat air (WHC) sebesar $76,23 \pm 0,49\%$, dan kandungan protein larut garam (PLG) $7,16 \pm 0,1\%$. Kekuatan gel surimi ikan kurisi mencapai $231,23 \pm 4,73$ g/cm², sementara hasil uji sensori menunjukkan nilai uji lipat sebesar $1,83 \pm 0,83$ dan uji gigit

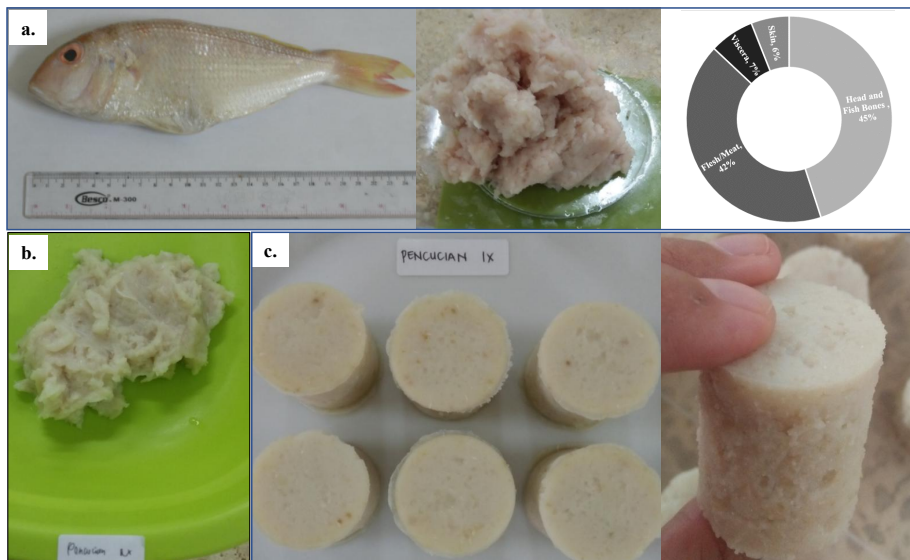


Figure 1 Visualization and quality assessment of raw surimi materials from threadfin bream (*Nemipterus* sp.). 1a) Threadfin bream with freshness values determined through sensory evaluation, TVB-N levels, and body part proportions presented in a pie chart; 1b) Fresh surimi prepared from threadfin bream; 1c) Quality assessment of threadfin bream surimi gel, including gel strength, folding test, and bite test

Gambar 1 Visualisasi dan mutu surimi ikan kurisi (*Nemipterus* sp.). 1a) Ikan kurisi dengan nilai kesegaran ditentukan melalui evaluasi sensoris, nilai TVB-N, dan proporsi bagian tubuh yang disajikan dalam diagram lingkaran; 1b) Surimi segar yang dibuat dari ikan kurisi; 1c) Penilaian kualitas gel surimi ikan kurisi, termasuk kekuatan gel, uji lipat, dan uji gigit

4,87±1,28, yang mengindikasikan gel surimi cenderung rendah (*low gel strength*) (Figure 1c). Secara keseluruhan surimi ikan kurisi memiliki potensi baik, namun beberapa parameter mutu masih perlu ditingkatkan untuk mencapai standar surimi berkualitas tinggi, terutama optimasi proses pengolahan.

Karakteristik Ultrapartikel dari Tulang Ikan Patin Kaya Kalsium

Tulang ikan hasil samping industri pengolahan patin terlihat masih banyak sisa-sisa daging dan terdapat sirip (Figure 2a). Setelah preparasi (perebusan, pembersihan, pemasakan dengan autoklaf, pengeringan dengan oven) dan pengecilan ukuran dengan lolos ayakan ukuran 60 mesh, warna secara visual terlihat kuning dan mikrostruktur menggunakan SEM terlihat berbentuk seperti serabut (Figure 2B1 and 2C1). Kalsinasi pada suhu 800°C menghasilkan produk dengan proporsi 45,73±0,10%, berwarna putih, dan

mikrostruktur permukaan dengan pori-pori terbuka dan tidak menggumpal (Figure 2B2 and 2C2), sedangkan setelah *nano milling* menjadi UpTIK memiliki struktur partikel bentuk bulat dengan tanpa aglomerasi dengan ukuran berkisar 70-100 nm, yang sesuai dengan ukuran yang dikemukakan Zhang *et al.* (2017) (Figure 2B3 and 2C3).

UpTIK memiliki kadar abu 49,63±0,33%. Unsur kalsium tergolong tinggi, yaitu 83,83±0,05% dan fosfor 13,29±0,05%. Analisis EDS menunjukkan bobot kalsium dan fosfor sebesar 22,45% dan 12,96%. Perbandingan Ca/P adalah 1,73, yang paling mendekati nilai stokiometri hidroksiapatit dengan rasio 1,67 (Riyanto *et al.*, 2013).

Spektrum gugus fungsi FTIR *Spectroscopy* dari UpTIK memperlihatkan bilangan gelombang dari gugus karbonat (CO₃²⁻), gugus fosfat (PO₄³⁻), dan hidroksil (OH⁻), yang menunjukkan karakteristik gugus fungsi hidroksiapatit Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂ (Figure 2D).

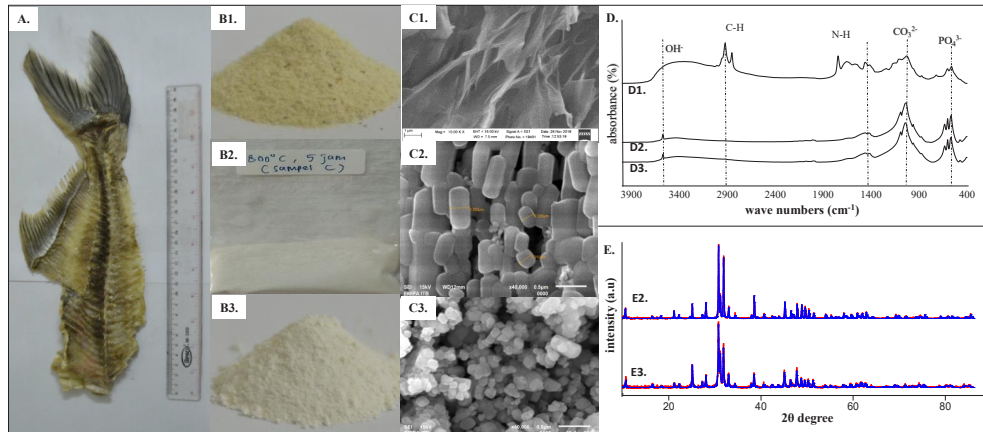


Figure 2 Characteristics of fish bones, fish bone powder calcined at 800°C, and calcium-rich fish bone ultraparticles (UpTIK) derived from catfish bones. A) Appearance of fish bones as by-products of the catfish processing industry, B) Visual appearance of fish bone powder (B1), calcined fish bone powder at 800°C (B2), and UpTIK from catfish bones (B3), C) Microstructure at 40,000x magnification via SEM, showing fish bone powder (C1), calcined powder at 800°C (C2), and UpTIK from catfish bones (C3), D) FTIR absorption spectra of functional groups for fish bone powder (D1), calcined powder at 800°C (D2), and UpTIK from catfish bones (D3), and E) XRD diffraction pattern of calcined powder at 800°C (E2) and UpTIK from catfish bones (E3)

Gambar 2 Karakteristik tulang ikan, bubuk tulang ikan yang dikalsinasi pada suhu 800°C, dan ultrapartikel tulang ikan kaya kalsium (UpTIK) yang berasal dari tulang ikan patin. A) Ketampakan tulang ikan sebagai produk sampingan dari industri pengolahan ikan patin, B) Ketampakan visual bubuk tulang ikan (B1), bubuk tulang ikan yang dikalsinasi pada suhu 800°C (B2), dan UpTIK dari tulang ikan patin (B3), C) Mikrostruktur pada perbesaran 40.000x melalui SEM, yang menunjukkan bubuk tulang ikan (C1), bubuk yang dikalsinasi pada suhu 800°C (C2), dan UpTIK dari tulang ikan patin (C3), D) Spektrum serapan FTIR dari gugus fungsi untuk bubuk tulang ikan (D1), bubuk yang dikalsinasi pada suhu 800°C (D2), dan UpTIK dari tulang ikan patin (D3), dan E) Pola difraksi XRD dari bubuk yang dikalsinasi pada suhu 800°C (E2) dan UpTIK dari tulang ikan patin (E3)

Pola difraksi X-RD dari UpTIK menunjukkan bahwa puncak-puncak didominasi oleh fasa hidroksiapatit. Dua puncak tertinggi adalah pada $2\theta = 32.9^\circ$ merupakan fasa hidroksiapatit. Fasa yang muncul selain hidroksiapatit adalah apatit karbonat tipe A, trikalsium fosfat, dan oktakalsium fosfat. Apatit karbonat tipe A terdeteksi pada $2\theta = 10.8^\circ$, oktakalsium fosfat terdeteksi pada $2\theta = 39.9^\circ$ dan 42° , sedangkan trikalsium fosfat terdeteksi pada sudut $2\theta = 35.6^\circ$, 44.5° , 51.3° , dan 56.0° . Derajat kristalinitas yang diperoleh kalsium fosfat hidroksida $(\text{Ca})_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ sebesar 60,5% dan kalsium tris fosfat hidroksida sebesar 39,5% dengan fasa yang sama (Figure 2E).

Karakteristik Mutu Surimi Ikan Kurisi melalui Aktivasi TGase Endogen dengan Ultrapartikel dari Tulang Ikan Patin Kaya Kalsium pada Pemanasan Microwave

Aktivitas ekstrak enzim TGase endogen

Aktivitas enzim TGase endogen dalam surimi ikan kurisi menunjukkan variasi yang bergantung pada UpTIK yang ditambahkan. Aktivitas tertinggi tercatat pada penambahan UpTIK sebesar 1% dengan nilai $0,47 \pm 0,05$ U/mL, yang signifikan lebih tinggi dibandingkan konsentrasi 0% ($0,13 \pm 0,2$ U/mL), 0,5% ($0,35 \pm 0,03$ U/mL), dan 2% ($0,15 \pm 0,02$ U/

mL). Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi 1% UpTIK memiliki pengaruh dalam mengaktivasi enzim TGase endogen.

Yin & Park (2014) menyatakan bahwa penambahan nanokalsium pada konsentrasi optimal dapat meningkatkan aktivitas enzim TGase endogen. Konsentrasi optimal nanokalsium untuk surimi ikan Alaska pollock adalah 1%. Benjakul *et al.* (2023) menyatakan bahwa ion kalsium mengaktifkan TGase endogen dengan menginduksi perubahan konformasi yang membuka sisi aktif enzim. Liu *et al.* (2024) menjelaskan bahwa ion kalsium berperan penting dalam aktivasi TGase endogen melalui pengaktifan sisi aktif pada enzim, yang melibatkan *catalytic triad* (Cys-His-Asp atau Cys-His-Asn). Dalam proses transfer asil, gugus thiol dari sistein pada sisi aktif berinteraksi dengan rantai samping glutamin dari substrat protein atau peptida, membentuk *thioester intermediate* yang kemudian mentransfer gugus asil ke substrat amin.

Aktivitas TGase endogen menggunakan spektrum gugus fungsi FTIR Spectroscopy memperlihatkan puncak-puncak pada bilangan gelombang yang menunjukkan komponen protein yang terkandung pada surimi ikan kurisi. Semua sampel terbentuk senyawa amida I pada bilangan gelombang 1.600-1.700 cm^{-1} dan amida A pada bilangan gelombang 3.300-3.600 cm^{-1} (Figure 3). Zhu *et al.* (2024) menyatakan bahwa secara umum pada bilangan gelombang 3.600-3.300 cm^{-1} menunjukkan adanya jenis senyawa amida A, pada bilangan gelombang 1.700-1.600 cm^{-1} senyawa amida I, pada bilangan gelombang 1.480-1.575 cm^{-1} senyawa amida II, dan pada bilangan gelombang 1.200-1.300 cm^{-1} senyawa amida III. Yang *et al.* (2024b) menyatakan bahwa enzim TGase endogen mengkatalisis reaksi antara gugus ϵ -amina pada residu lisin dan gugus γ -karboksiamida pada residu glutamin. Penguatan ikatan terjadi khususnya antara ikatan C=O yang berikatan dengan gugus N-H pada bilangan gelombang 1.635-

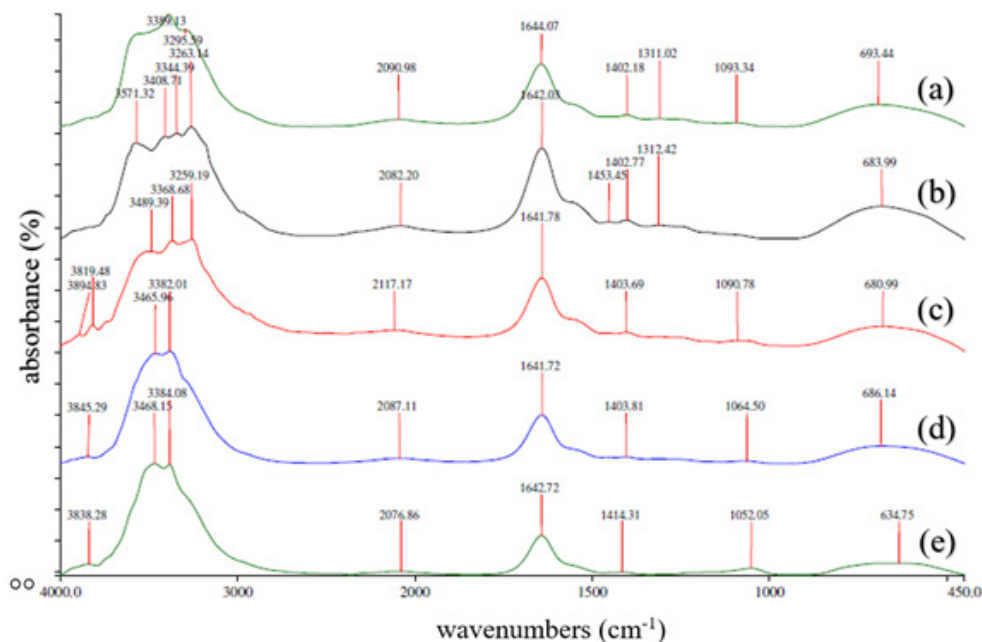


Figure 3 Functional group spectrum of FTIR spectroscopy for endogenous TGase activation in threadfin bream surimi. (a) Endogenous TGase activation in fresh threadfin bream surimi, (b) Endogenous TGase activation in threadfin bream surimi with 0% UpTIK, (c) 0.5%, (d) 1%, and (e) 2%

Gambar 3 Spektrum gugus fungsi spektroskopi FTIR untuk aktivasi TGase endogen pada surimi ikan kurisi. (a) Aktivasi TGase endogen pada surimi ikan kurisi, (b) Aktivasi TGase endogen pada surimi ikan kurisi 0% UpTIK, (c) 0,5%, (d) 1%, dan (e) 2%



1.637 cm^{-1} dan ikatan C-N pada panjang gelombang 1.155 cm^{-1} . Ikatan silang tersebut dapat terjadi secara intermolekular atau intramolekular. Aktivitas TGase endogen pada spektrum gugus fungsi FTIR Spectroscopy ditunjukkan pada bilangan gelombang 3.800-3.900 cm^{-1} , yaitu adanya gugus senyawa N-H yang diindikasikan bahwa enzim TGase endogen aktif dengan adanya kalsium.

Profil suhu-waktu pemanasan dengan gelombang mikro

Pemanasan gelombang mikro menunjukkan peningkatan suhu yang jauh lebih cepat dan mencapai suhu yang lebih tinggi, secara keseluruhan hanya membutuhkan waktu 15 menit dan terlihat tahap *setting* diperkirakan hanya berlangsung selama 3 menit (Figure 4). Tidak ditemukan pengaruh yang signifikan dari perbedaan penambahan UpTIK pada profil pemanasan. Tingkat kesesuaian dengan pemanasan

konvensional menggunakan penangas air digital, terlihat tahap *setting* untuk mencapai suhu 40°C memerlukan 10 menit, dengan keseluruhan proses *setting* berlangsung selama 20 menit.

Efektivitas pemanasan gelombang mikro disebabkan oleh karakteristik gelombang mikro yang memungkinkan penetrasi yang lebih dalam dan distribusi panas yang cepat ke dalam bahan. Temuan ini penting untuk produk berbasis surimi, yang membutuhkan suhu tinggi untuk membentuk gel berkualitas baik. Menurut Wang *et al.* (2023a), pemanasan gelombang mikro dapat mengurangi waktu *setting* dan pemasakan menjadi hanya 11 menit, mengurangi waktu pemanasan hingga 80%, sehingga lebih efisien dan berpotensi meningkatkan kualitas gel. Hal ini menunjukkan bahwa pemanasan dengan gelombang mikro dapat menjadi metode yang lebih efisien untuk pemrosesan produk surimi, yang mendukung peningkatan laju produksi

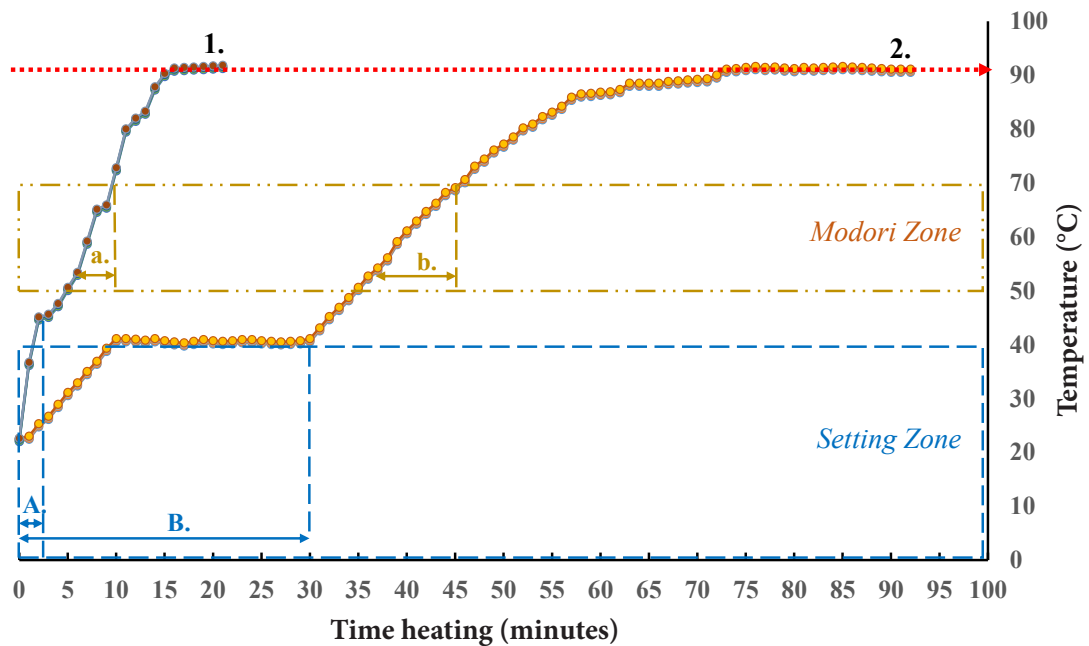


Figure 4 Time-temperature heating profiles of surimi enriched with calcium-rich fish bone ultraparticles (UpTIK) using microwave (1) and digital water bath treatments as a comparison (2). A. Microwave setting zone, B. Digital water bath setting zone, a. Microwave modori zone, b. Digital water bath modori zone

Gambar 4 Profil pemanasan waktu-suhu surimi yang diperkaya dengan ultrapartikel tulang ikan kaya kalsium (UpTIK) menggunakan perlakuan gelombang mikro (1) dan penangas air digital sebagai pembandingan (2). A. Zona pengaturan gelombang mikro, B. Zona pengaturan penangas air digital, a. Zona modori gelombang mikro, b. Zona modori penangas air digital





dan kemungkinan menghasilkan kualitas gel yang lebih baik.

Prinsip pemanasan gelombang mikro adalah setelah energi diserap, molekul polar (molekul air) yang ada di dalam makanan akan mengarah sesuai medan elektromagnetik yang berganti-ganti. Molekul air adalah “dipol” dengan satu ujung bermuatan positif dan satu ujung bermuatan negatif. Rotasi molekul air akan menghasilkan panas untuk memasak. Pemanasan gelombang mikro memiliki karakteristik memanaskan bagian dalam bahan terlebih dahulu, sedangkan pemanasan konvensional akan memanaskan di bagian luar melalui konveksi dengan media air setelah itu panas merambat secara konduksi mencapai bagian dalam produk (Ji *et al.*, 2017). Pemanasan gelombang mikro memiliki proses pemanasan yang menyebarkan ke seluruh bagian bahan karena terdapatnya kandungan air, sehingga proses pemanasan menjadi lebih efisien tanpa perlu mempertimbangkan kehilangan udara.

Nilai warna $L^*a^*b^*$ dan derajat putih

Penambahan UpTIK tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap derajat putih surimi (Table 1), dan hasil ini konsisten dengan penelitian Kang *et al.* (2021) dan Riyanto *et al.* (2020), yang menyampaikan bahwa modifikasi kalsium pada ukuran mikron tidak selalu memberikan pengaruh terhadap derajat putih produk berbasis protein. Nilai L^* menunjukkan peningkatan kecerahan pada surimi, namun terlihat tidak adanya pengaruh dari ukuran yang sangat kecil UpTIK. Nilai a^* menunjukkan bahwa penambahan UpTIK dapat memberikan warna yang lebih netral, sedangkan nilai b^* yang menunjukkan sedikit kekuningan mengindikasikan warna mendekati putih. Secara keseluruhan, derajat putih mendukung argumen bahwa aktivasi UpTIK efektif dalam meningkatkan mutu dan ketampakan surimi ikan kurisi, namun pemanasan gelombang mikro dapat menyebabkan denaturasi protein dan degradasi pigmen, dan keberadaan UpTIK dimungkinkan sebagai stabilisator

Table 1 Effect of calcium-rich fish bone ultraparticle (UpTIK) activation on color values and values and whiteness degree of surimi from threadfin bream under microwave heating
 Tabel 1 Efek ultrapartikel dari tulang ikan patin kaya kalsium (UpTIK) terhadap nilai warna dan derajat keputihan surimi ikan kurisi pada pemanasan gelombang mikro

UpTIK activation (%)	L^* value (lightness)	a^* value (green-red)	b^* value (blue-yellow)	Whiteness degree (%)	Whiteness appearance of surimi from threadfin bream
0	88.55±0.25	-2.20±0.87	11.08±8.50	83.17±0.04 ^a	
0.5	86.82±1.61	-0.01±1.45	5.96±0.87	85.45±1.32 ^a	
1	89.83±2.66	-0.69±1.30	7.41±0.84	87.24±1.87 ^a	
2	90.85±2.65	0.66±1.31	1.51±5.24	89.83±1.25 ^a	

L^* , a^* , and b^* values refer to the CIELAB color system used for color characterization; Different letters on the same row indicates significant differences ($p < 0.05$)



yang mempertahankan tampilan visual surimi, terutama pada konsentrasi yang lebih tinggi (1% dan 2%).

Water holding capacity

Water holding capacity (WHC) tertinggi pada surimi ikan kurisi dicapai melalui aktivasi transglutaminase (TGase) endogen dengan penambahan UpTIK 1%, yaitu 87,88%. Aktivasi ini membuktikan bahwa UpTIK efektif sebagai sumber kalsium yang dapat meningkatkan kemampuan surimi untuk mempertahankan air, sehingga sangat penting karena dapat memengaruhi tekstur dan kualitas produk. Penggunaan gelombang mikro terbukti lebih efektif. Gelombang mikro menciptakan kondisi optimal karena pemanasan berlangsung cepat dan merata. Ion kalsium (Ca^{2+}) yang dilepaskan dari UpTIK berperan dalam memperkuat ikatan silang antar protein miofibril, sehingga jaringan gel surimi menjadi lebih padat dan mampu menahan air dengan baik.

Penambahan UpTIK pada konsentrasi 0,5% dan 1% berhasil meningkatkan WHC secara signifikan, namun penggunaan konsentrasi 2% tidak memberikan peningkatan tambahan pada WHC (*Figure 5*). Hal ini diduga oleh kelebihan ion kalsium yang dapat menyebabkan pembentukan ikatan silang berlebih, sehingga struktur gel menjadi rapuh dan akhirnya menurunkan kemampuan gel untuk mempertahankan air. Studi ini sejalan dengan Ding *et al.* (2019) dan Huang *et al.* (2021) menyatakan bahwa WHC dipengaruhi oleh interaksi molekul air dengan protein serta kerapatan jaringan gel. Ion kalsium pada konsentrasi optimal membantu pembentukan ikatan silang yang kuat, menciptakan struktur gel tiga dimensi yang stabil. Selain itu, Petcharat & Benjakul (2017) menunjukkan bahwa kalsium tidak hanya memperkuat jaringan protein tetapi juga membantu mengaktifkan TGase, yang mempercepat proses pembentukan gel.

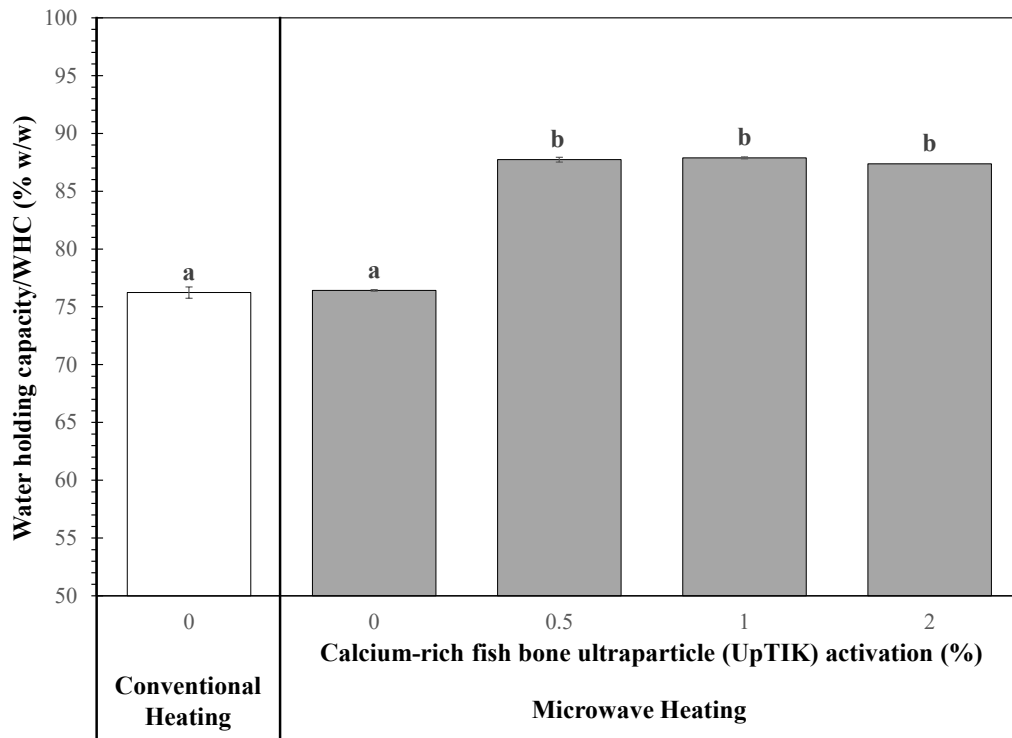
Protein larut garam

Penambahan UpTIK memberikan pengaruh signifikan terhadap kadar protein larut garam surimi ikan kurisi. Tanpa penambahan UpTIK (0%), kadar protein

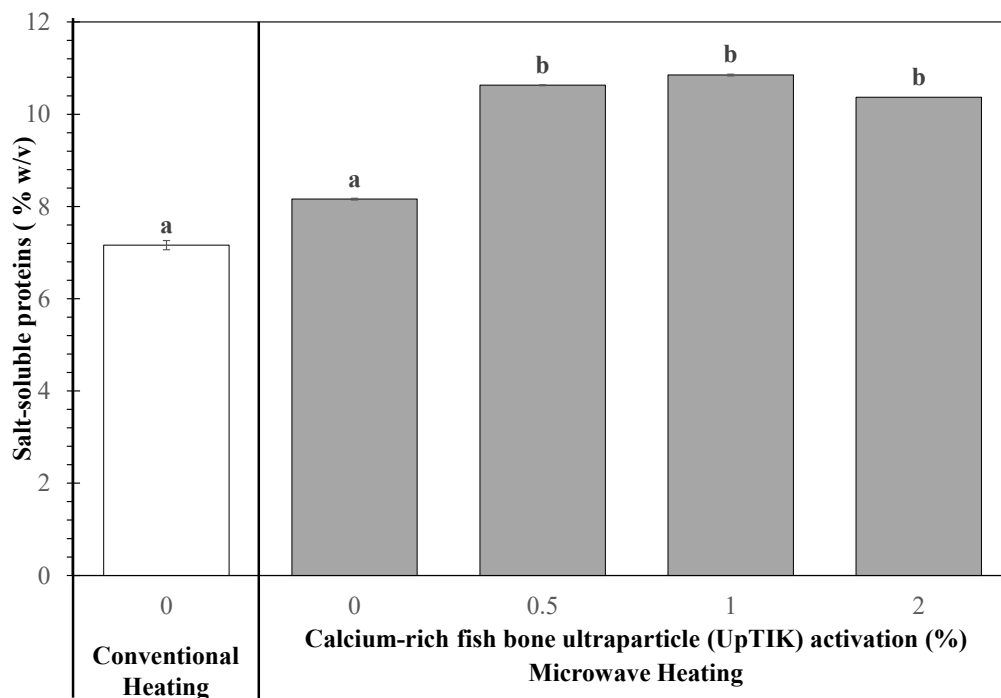
larut garam hanya mencapai 8,16%, nilai terendah di antara semua perlakuan (*Figure 6*). Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas transglutaminase (TGase) endogen tanpa tambahan ion kalsium dari UpTIK masih terbatas dalam membentuk ikatan silang antar protein miofibril. Penambahan UpTIK 0,5%, kadar protein larut garam meningkat signifikan menjadi 10,63%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa ion kalsium (Ca^{2+}) yang dilepaskan dari UpTIK dapat mengaktifkan TGase secara efektif dan memperkuat struktur jaringan protein. Konsentrasi 1% UpTIK menghasilkan kadar protein larut garam tertinggi, yaitu 10,85%, meskipun tidak berbeda nyata dibandingkan 0,5%. Konsentrasi ini diduga sebagai titik optimal, yaitu jumlah kalsium yang dilepaskan mencukupi untuk memaksimalkan aktivitas TGase dalam memperkuat ikatan silang antar protein. Sebaliknya, penambahan UpTIK hingga 2% menyebabkan penurunan kadar protein larut garam. Meskipun tidak signifikan ($p > 0,05$), fenomena ini kemungkinan disebabkan oleh kelebihan ion kalsium yang dapat memicu agregasi atau presipitasi protein, sehingga mengurangi efisiensi pembentukan struktur protein yang stabil. Adapun pemanasan gelombang mikro berperan penting dalam meningkatkan efektivitas aktivasi TGase. Pemanasan ini menciptakan kondisi optimal untuk reaksi enzimatik karena berlangsung cepat dan merata.

Kekuatan gel

Penambahan UpTIK memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kekuatan gel surimi ikan kurisi. Tanpa penambahan UpTIK, kekuatan gel hanya mencapai 230,24 g/cm^2 , yang menunjukkan lemahnya struktur gel akibat terbatasnya aktivasi transglutaminase (TGase) endogen dari minimnya ion kalsium. Penambahan UpTIK 0,5% memperlihatkan adanya peningkatan kekuatan gel secara signifikan menjadi 486,48 g/cm^2 . Peningkatan ini menunjukkan bahwa ion kalsium yang dilepaskan dari UpTIK mampu mengaktifkan TGase, sehingga memperkuat ikatan silang antar protein miofibril.



(A)



(B)

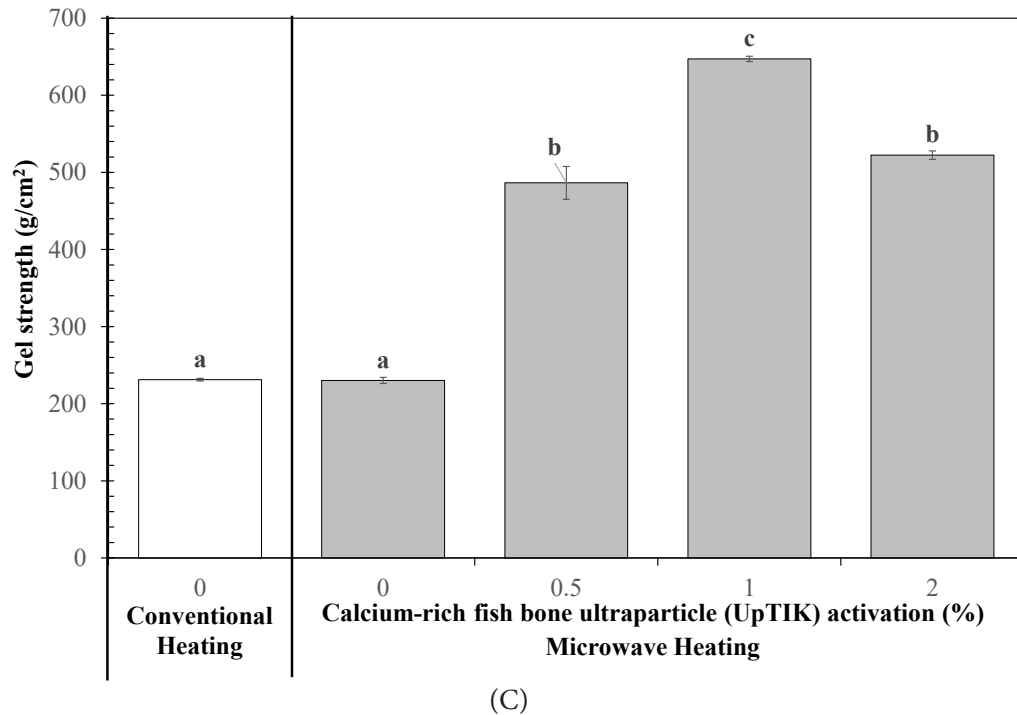


Figure 5 Quality characteristics of threadfin bream surimi through endogenous transglutaminase activation using calcium-rich fish bone ultraparticles (UpTIK) with microwave heating and its comparison to conventional heating; (A) Water holding capacity, (B) Salt-soluble proteins, (C) Gel strength.

Data with different superscript letters (a, b, c) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

Gambar 5 Daya ikat air surimi ikan kurisi melalui aktivasi transglutaminase endogen menggunakan ultrapartikel dari tulang ikan patin kaya kalsium (UpTIK) dengan pemanasan gelombang mikro; (A) *Water holding capacity*, (B) Protein larut garam, (C) Kekuatan gel.

Data dengan huruf superskrip yang berbeda (a, b, c) menunjukkan perbedaan yang signifikan secara statistik ($p < 0,05$)

Pada konsentrasi UpTIK 1%, kekuatan gel mencapai nilai tertinggi, yaitu 647,17 g/cm², dan berbeda signifikan ($p < 0,05$) dibandingkan tanpa UpTIK dan UpTIK 0,5%. Konsentrasi ini dianggap optimal karena jumlah ion kalsium yang dilepaskan cukup untuk memaksimalkan aktivitas TGase, menghasilkan jaringan gel tiga dimensi yang lebih padat dan stabil. Aktivasi TGase yang didukung pemanasan gelombang mikro pada konsentrasi ini juga mempercepat pembentukan ikatan silang, sehingga menghasilkan gel dengan kualitas terbaik. Namun, penambahan UpTIK 2% memperlihatkan penurunan kekuatan gel menjadi 522,49 g/cm². Penurunan ini diduga

kelebihan ion kalsium yang dapat mengganggu stabilitas gel melalui agregasi atau presipitasi protein miofibril. Fenomena ini sesuai Huang *et al.* (2021), yang menyatakan bahwa kelebihan kalsium pada konsentrasi tinggi dapat bersifat kompetitif terhadap interaksi ion kalsium dengan protein, sehingga menghambat pembentukan ikatan silang yang optimal.

Ion kalsium berperan dalam peningkatan gelasi surimi melalui pembentukan ikatan silang (*cross-linking*) pada rantai berat miosin (myosin heavy chain). TGase endogen mengkatalisis pembentukan ikatan silang ϵ -(γ -glutamyl)-

lisina antara protein, sekaligus memperkuat interaksi hidrofobik dan ikatan hidrogen selama pemanasan gelombang mikro (Fang *et al.*, 2021). Penambahan kalsium dalam ukuran ultrameter seperti UpTIK, mampu meningkatkan efisiensi pembentukan gel (Liu *et al.*, 2022). Eom dan Nam (2024) juga menunjukkan bahwa penambahan nanokalsium dari tulang ikan pada surimi ikan Alaska pollock mencapai aktivitas enzimatis optimum pada konsentrasi 1%.

KESIMPULAN

Penambahan 1% UpTIK secara signifikan meningkatkan aktivitas TGase endogen ($0,47 \pm 0,05$ U/mL) dan kekuatan gel surimi ikan kurisi ($647,17$ g/cm²) selama pemanasan gelombang mikro. Waktu pemanasan gelombang mikro terbukti tiga kali lebih efisien dibandingkan pemanasan konvensional. Temuan ini menawarkan solusi inovatif pemanfaatan limbah tulang ikan untuk diversifikasi produk surimi berbasis perikanan tropis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknologi Hasil Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University atas penyediaan seluruh fasilitas yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

An, Y., Xiong, S., Liu, R., You, J., Yin, T., & Hu, Y. (2021). The effect of cross-linking degree on physicochemical properties of surimi gel as affected by MTGase. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(15), 6228-6238. <http://doi.org/10.1002/jsfa.11274>

[AOAC] Association of Official Analytical Chemist. (2005). Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist. 18th ed.

[BSN] Badan Standardisasi Nasional. (2006). SNI 01-2354.8:2009. Cara uji kimia - Bagian 8: Penentuan kadar Total Volatil Base Nitrogen (TVB-N) dan Trimetil Amin Nitrogen (TMA-N) pada produk perikanan.

[BSN] Badan Standardisasi Nasional. (2015). SNI 01-2346:2015. Pedoman Pengujian Sensori pada Produk Perikanan.

[BSN] Badan Standardisasi Nasional. (2021). SNI 2729:2021. Ikan segar

[BSN] Badan Standardisasi Nasional. (2021). SNI 2694:2021. Surimi beku.

[BSN] Badan Standardisasi Nasional. (2021). SNI 7266:2017. Bakso ikan

Benjakul, S., Singh, A., Sae-Leaw, T., & Balange, A. K. (2023). Endogenous Enzymes: Their Roles in Quality of Fish/Shellfish and Their Products. In *Advances in Fish Processing Technologies*. Apple Academic Press. pp. 235-269.

Cao, H. D., Fan, X., Jiao, J., Huang, J. Zhao, B., Yan, W., Zhou, W., Zhang, W., Ye, H., & Zhang. (2019). Importance of thickness in electromagnetic properties and gel characteristics of surimi during microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 248, 80-8. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.01.003>.

Ding, H. C., Li, X. P., Li, R. Z., Yi, S. M., Xu, Y. X., Mi, H. B., & Li, J. R. (2019). Changes of water state and gel characteristics of Hairtail (*Trichiurus lepturus*) surimi during thermal processing. *Journal of Texture Studies*, 50(4), 332-340. <http://doi.org/10.1111/jtxs.12393>

Eom, T., & Nam, T. J. (2024). Calcium absorption by Alaska pollock surimi protein hydrolysate promotes osteoblast differentiation. *Journal of Food Science*, 89(4), 2482-2493. <http://doi.org/10.1111/1750-3841.16988>

Fang, Q., Shi, L., Ren, Z., Hao, G., Chen, J., & Weng, W. (2021). Effects of emulsified lard and TGase on gel properties of threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) surimi. *LWT-Food Science and Technology*, 146, 1-8. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111513>

Huang, P. H., Cheng, Y. T., Chan, Y. J., Lu, W. C., Ko, W. C., Hsieh, H. C., & Li, P. H. (2023). Minimal addition of transglutaminase on the preparation and characteristics of tilapia (*Oreochromis mossambicus*) surimi. *Fisheries Science*, 89(5), 699-708. <http://doi.org/10.1007/s12562-023-01699-1>

Huang, Q., Huang, X., Liu, L., Song, H., Geng, F., Wu, W., & Luo, P. (2021). Nano eggshell calcium enhanced gel properties of *Nemipterus virgatus* surimi sausage: Gel strength, water retention and microstructure. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(11), 5738-5752. <http://doi.org/10.1111/ijfs.15142>

Ji, L., Xue, Y., Zhang, T., Li, Z., & Xue, C. (2017). The effects of microwave processing on the structure and various quality parameters of Alaska pollock surimi protein polysaccharide gels. *Food Hydrocolloids*, 63, 77-84. <http://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.011>

Jiao, X., Yang, H., Li, X., Cao, H., Zhang, N., Yan, B.,



- Hu, B., Huang, J., Zhao, J., Zhang, H., Chen, W., & Fan, D. (2023). Green and sustainable microwave processing of surimi seafoods: A review of protein component interactions, mechanisms, and industrial applications. *Trends in Food Science & Technology*, 143, 104266. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104266>
- Kang, Z. L., Zhang, X. H., Li, K., Li, Y. P., Lu, F., Ma, H. J., Song, Z. J., Zhao, S. M., & Zhu, M. M. (2021). Effects of sodium bicarbonate on the gel properties, water distribution and mobility of low-salt pork batters. *LWT-Food Science and Technology*, 139(1), 1-8. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110567>
- Liu, J., Yang, S., Tang, R., Yang, W., & Xing, G. (2024). Enhanced tofu quality through calcium sulfate and transglutaminase treatment: physicochemical properties and digestibility analysis. *International Journal of Food Science & Technology*, 59(10), 7610-7618. <http://doi.org/10.1111/ijfs.17543>
- Liu, L., Xiong, Y., Yin, T., Xiong, S., You, J., Liu, R., Huang, Q., & Shi, L. (2022). Effects of repeated deboning on structure, composition, and gelling properties of silver carp surimi. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(12), 5312-5320. <http://doi.org/10.1002/jsfa.11885>
- Meng, L., Jiao, X., Yan, B., Huang, J., Zhao, J., Zhang, H., Chen, W., & Fan, D. (2021). Effect of fish mince size on physicochemical and gelling properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gel. *LWT-Food Science and Technology*, 149, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111912>
- Nakamura, Y., Takahashi, S., & Takahashi, K. (2021). Long-term suppression of suwari phenomenon for improvement in the manufacturing process of surimi gel product. *LWT-Food Science and Technology*, 150, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111934>
- Nawaz, A., Xiong, Z., Xiong, H., Chen, L., Wang, P. K., Ahmad, I., Hu, C., Irshad, S. & Ali, S.W. (2019). The effects of fish meat and fish bone addition on nutritional value, texture and microstructure of optimised fried snacks. *International Journal of Food Science and Technology*, 54, 1045-1053. <http://doi.org/10.1111/ijfs.13974>
- Petcharat, T., & Benjakul, S. (2017). Effect of gellan and calcium chloride on properties of surimi gel with low and high setting phenomena. *RSC advances*, 7(83), 52423-52434. <http://doi.org/10.1039/C7RA10869A>
- Riyanto, B., Maddu, A., & Nurrahman. (2013). Material biokeramik berbasis hidroksiapatit tulang ikan tuna. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 16(2), 119-132. <http://doi.org/10.17844/jphpi.v16i2.8046>
- Riyanto, B., Rizqtha Maghfira Setiawan, A., Trilaksani, W., & Ramadhan, W. (2024). Effect of Post-ultrasonication-Assisted Treatment on Biocalcium Extraction from Tuna Eye Scleral Cartilage. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 1-14. <http://doi.org/10.1080/10498850.2024.2439323>
- Riyanto, B., Trilaksani, W., & Azzahra, V. A. (2020). Desain pangan instan gizi khusus lansia berbasis binte biluhuta diperkaya nanomineral tulang ikan. *Jurnal Fishtech*, 9(2), 65-77. <http://doi.org/10.36706/fishtech.v9i2.9923>
- Savlak, N., Çağındı, Ö., Erk, G., Öktem, B., & Köse, E. (2020). Treatment method affects color, chemical, and mineral composition of seabream (*Sparus aurata*) fish bone powder from by-products of fish fillet. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 29(6), 592-602. <http://doi.org/10.1080/10498850.2020.1775742>
- Song, Z., Zhang, S., Qi, X., Yin, M., & Wang, X. (2024). Application of ultrasound technology in the washing process of surimi: improvement of meat yield and gel quality. *Food Biophysics*, 1-16. <http://doi.org/10.1007/s11483-024-09843-9>
- Tolano-Villaverde, I. J., Torres-Arreola, W., Ocaño-Higuera, V. M., & Marquez-Rios, E. (2016). Thermal gelation of myofibrillar proteins from aquatic organisms. *CyTA-Journal of Food*, 14(3), 502-508. <http://doi.org/10.1080/19476337.2015.1116024>
- Wang, X., Yi, Y., Guo, C., Wang, X., Yu, J., & Xia, S. (2023a). Enhanced sodium release and saltiness perception of surimi gels by microwave combined with water bath heating. *Food Hydrocolloids*, 134(1), 108018. <http://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108018>
- Wang, Y., Tian, Y., Sun, J., & Yang, H. (2023b). Physicochemical properties of grass carp surimi as affected by pH and NaCl concentration during washing. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 952-962. <http://doi.org/10.1080/10942912.2023.2197168>
- Xie, D., Tang, Y., & Dong, G. (2024). Various factors affecting the gel properties of surimi: A review. *Journal of Texture Studies*, 55(3), e12847. <http://doi.org/10.1111/jtxs.12847>
- Yang, S., Tu, Z. C., Wang, H., & Hu, Y. M. (2020). Effects of coagulant promoter on the

- physical properties and microstructure of the mixed system of ultrafine fishbone and surimi. *LWT- Food Science and Technology*, 131(2), 1-32. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109792>
- Yang, Z., Lu, K., Zhao, Y., Shi, X., Mao, W., Zheng, B., Xu Y., Gao P., & Zhou, R. (2024a). Effects of different heat-induced setting methods on the structural stability and properties of 3D-printed surimi gels. *LWT-Food Science and Technology*, 198, 115957. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115957>
- Yang, M. L., Wang, H., Zhou, Y. Q., Yin, J. F., Huang, J. J., Yan, Y., Zhang, F.S., & Xie, N. N. (2024b). Novel insights into induced low-salt Mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) surimi gel with transglutaminase and microwave heating. *International Food Research Journal*, 31(4), 896-907. <http://doi.org/10.47836/ifrj.31.4.08>
- Yin, T., Du, H., Zhang, J., & Xiong, S. (2016). Preparation and characterization of ultrafine fish bone powder. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 25(7), 1-27. <http://doi.org/10.1080/10498850.2015.1010128>
- Yin, T., & Park, J. W. (2014). Effects of nano-scaled fish bone on the gelation properties of Alaska pollock surimi. *Food Chemistry*, 150, 463-468. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.041>
- Yin, T., Reed, Z. H., & Park, J. W. (2014). Gelling properties of surimi as affected by the particle size of fish bone. *LWT-Food Science and Technology*, 58(2), 412-416. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.037>
- Yin, T., & Park, J. W. (2015). Textural and rheological properties of Pacific whiting surimi as affected by nano-scaled fish bone and heating rates. *Food Chemistry*, 180, 42-47. <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.021>
- Yin, T., Park, J. W., & Xiong, S. (2017). Effects of micron fish bone with different particle size on the properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels. *Journal of Food Quality*, 2017(1), 1-9. <http://doi.org/10.1155/2017/8078062>
- Zhao, Y., Wei, G., Li, J., Tian, F., Zheng, B., Gao, P., & Zhou, R. (2023). Comparative study on the effect of different salts on surimi gelation and gel properties. *Food Hydrocolloids*, 144(10), 108982. <http://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108982>
- Zhao, Z., Wang, Q., Yan, B., Gao, W., Jiao, X., Huang, J., Zhao, J., Zhang, H., Chen, W., & Fan, D. (2021). Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67(6), 102546. <http://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102546>
- Zhang, J., He, S., Kong, F., Huang, S., Xiong, S., Yin, T., Du, H., Liu, R., & Zhang, M. (2017). Size reduction and calcium release of fish bone particles during nanomilling as affected by bone structure. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 2176-2187. <http://doi.org/10.1007/s11947-017-1987-z>
- Zhu, S., Wang, Y., Ding, Y., Xiang, X., Yang, Q., Wei, Z., song, H., Liu, S., & Zhou, X. (2024). Improved texture properties and toughening mechanisms of surimi gels by double network strategies. *Food Hydrocolloids*, 152, 109900. <http://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109900>