

Karakterisasi Fisikokimia Tepung Sagu Termodifikasi sebagai Bahan Baku Pangan Fungsional Berbasis Pangan Lokal

Chalik Mawardi¹
Kurniati Tajuddin²
Rahman Syam³
Ehlisa⁴

¹²³⁴ Politeknik Dewantara, Palopo

¹chalikmawardi@gmail.com,

²kurniatitajuddin180@gmail.com,

³rahmansyam@polidewa.ac.id

⁴ehlisarahmat@polidewa.ac.id

Abstrak

Tepung sagu merupakan salah satu sumber karbohidrat potensial dari tanaman lokal Indonesia yang memiliki prospek besar sebagai bahan baku pangan fungsional. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi sifat fisikokimia tepung sagu termodifikasi menggunakan metode *Heat Moisture Treatment* (HMT) serta mengevaluasi potensinya sebagai bahan baku pangan fungsional, khususnya pada parameter kadar karbohidrat, serat pangan, dan kandungan mineral. Sampel tepung sagu dimodifikasi menggunakan metode fisik pada variasi suhu (80°C, 100°C, 120°C) dan waktu perlakuan (4, 8, 12 jam). Parameter yang dianalisis meliputi kadar karbohidrat, serat pangan (serat larut dan tidak larut), serta kandungan mineral (kalsium, fosfor, besi, dan kalium). Hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi HMT pada suhu 100°C selama 8 jam menghasilkan tepung sagu termodifikasi terbaik dengan kadar karbohidrat total sebesar $85,42 \pm 1,23\%$, kandungan serat pangan total $6,78 \pm 0,45\%$ yang terdiri atas serat larut $2,14 \pm 0,18\%$ dan serat tidak larut $4,64 \pm 0,31\%$, serta kandungan mineral meliputi kalsium (38,7 mg/100 g), fosfor (112,4 mg/100 g), besi (2,9 mg/100 g), dan kalium (145,6 mg/100 g). Modifikasi fisik secara signifikan meningkatkan kandungan pati resisten dan serat pangan dibandingkan tepung sagu alami, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku pangan fungsional untuk mendukung ketahanan pangan berbasis lokal.

Kata kunci: tepung sagu, modifikasi fisik, HMT, pangan fungsional, serat pangan, mineral, pati resisten

Wanatani

Vol. 6, No. 1, 2026

ISSN 2808-7704 (Online)

Corresponding Email

Chalik Mawardi
chalikmawardi@gmail.com

Copyright © 2026

The Author(s)

This article is licensed under
CC BY-NC-SA 4.0 License



Pendahuluan

Tanaman sagu (*Metroxylon sagu Rottb*) merupakan salah satu komoditas pangan lokal Indonesia yang memiliki potensi besar sebagai sumber karbohidrat alternatif pengganti beras dan terigu. Indonesia merupakan negara dengan cadangan sagu terbesar di dunia, dengan luas areal sekitar 5,5 juta hektar yang tersebar di wilayah Papua, Maluku, Sulawesi, Kalimantan, dan Riau (Badan Pusat Statistik, 2023). Produktivitas pati sagu yang tinggi mencapai 15–25 ton per hektar per tahun menjadikan tanaman ini sebagai sumber karbohidrat yang sangat efisien dibandingkan komoditas lainnya (Limbongan, 2020; Haska et al., 2021). Potensi sagu sebagai bahan pangan lokal strategis telah diakui dalam berbagai kajian diversifikasi pangan nasional mengingat kemampuannya tumbuh di lahan marginal dan rawa yang tidak cocok untuk tanaman pangan lain (Novariant et al., 2022).

Namun demikian, tepung sagu alami memiliki keterbatasan fungsional yang membatasi penggunaannya dalam industri pangan, di antaranya retrogradasi pati yang cepat, stabilitas rendah terhadap panas dan asam, serta kemampuan pembentukan gel yang kurang konsisten (Flach, 2021; Tethool et al., 2020). Selain itu, sifat hidrofilik pati sagu alami yang tinggi menyebabkan tekstur produk yang tidak stabil selama penyimpanan (Sajilata et al., 2021). Modifikasi tepung sagu menjadi alternatif solusi yang telah banyak dikaji untuk meningkatkan sifat fungsional dan nilai gizi tepung sagu agar sesuai dengan kebutuhan industri pangan fungsional masa kini (Moorthy, 2022).

Metode modifikasi fisik seperti *Heat Moisture Treatment* (HMT) telah terbukti efektif dalam mengubah struktur kristal pati, meningkatkan kandungan pati resisten, dan memperbaiki profil serat pangan tanpa menggunakan bahan kimia tambahan sehingga lebih aman untuk dikonsumsi (Pukkahuta et al., 2022; Wardhani et al., 2023). Selain HMT, metode *annealing* dan *autoclaving-cooling* juga dikenal mampu memodifikasi sifat fisikokimia pati, namun HMT memberikan keunggulan dalam hal efisiensi energi dan konsistensi hasil (Chung et al., 2020; Zhang et al., 2021). Pati resisten yang terbentuk dari proses modifikasi ini memiliki manfaat kesehatan seperti prebiotik, penurunan indeks glikemik, dan pengurangan risiko penyakit metabolik (Birt et al., 2022).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji modifikasi pati dari berbagai sumber lokal menggunakan metode fisik. Pukkahuta et al. (2022) melaporkan bahwa HMT pada pati sagu meningkatkan kandungan pati resisten dan memperkuat struktur kristalinitas tipe A–B, namun penelitian tersebut hanya berfokus pada parameter tekstural dan tidak mencakup analisis serat pangan maupun kandungan mineral secara komprehensif. Wardhani et al. (2023) mengoptimasi kondisi HMT untuk pati sagu dengan menggunakan pendekatan *response surface methodology* dan menemukan bahwa suhu 95–105°C menghasilkan sifat fungsional terbaik, namun variabel yang diukur terbatas pada swelling power, solubility, dan viskositas pasta, tanpa mengkaji potensi pangan fungsionalnya. Mulyono et al. (2022) mengevaluasi karakteristik fisik pati sagu termodifikasi dan melaporkan peningkatan pati resisten, tetapi tidak mengintegrasikan analisis serat pangan terlarut dan tidak terlarut serta kandungan mineral dalam satu kerangka kajian yang utuh. Di sisi lain, Ramachandraiah et al. (2021) mengkarakterisasi tepung sagu kaya serat dan menguji daya cerna pati secara in vitro, tetapi tidak menggunakan pendekatan modifikasi fisik HMT dan tidak mengevaluasi kandungan mineral sebagai indikator pangan fungsional. Chung et al. (2020) serta Zhang et al. (2021) mengkaji pengaruh HMT terhadap struktur granula pati dari sumber non-sagu (beras dan jagung), sehingga relevansinya terhadap karakteristik unik pati sagu tropis masih terbatas. Secara keseluruhan, studi-studi terdahulu belum mengintegrasikan evaluasi

simultan terhadap kadar karbohidrat (termasuk pati resisten), profil serat pangan (SDF dan IDF), serta kandungan mineral (Ca, P, Fe, K) pada tepung sagu termodifikasi HMT dalam konteks pengembangan pangan fungsional berbasis lokal.

Berdasarkan kajian literatur di atas, terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang signifikan. Pertama, belum ada penelitian yang secara simultan mengkarakterisasi tiga parameter utama pangan fungsional kadar karbohidrat (pati resisten), profil serat pangan (SDF dan IDF), serta kandungan mineral (Ca, P, Fe, K) pada tepung sagu termodifikasi HMT dari sumber lokal Indonesia. Kedua, kajian pengaruh variasi suhu HMT (80°C, 100°C, 120°C) dan durasi perlakuan (4, 8, 12 jam) secara faktorial terhadap keseluruhan parameter fisikokimia yang relevan dengan pangan fungsional pada pati sagu belum dilaporkan secara komprehensif. Ketiga, tepung sagu yang dikaji dalam penelitian sebelumnya umumnya berasal dari sumber komersial yang tidak teridentifikasi asal geografisnya, sehingga karakteristik fisikokimia sagu dari wilayah spesifik seperti Kabupaten Luwu Utara yang memiliki karakteristik agroklimat tersendiri belum pernah dieksplorasi. Keempat, potensi tepung sagu termodifikasi sebagai bahan baku pangan fungsional berbasis lokal dalam kerangka kebijakan diversifikasi pangan nasional belum dikaji secara terintegrasi dari perspektif ilmiah (Kemenkes RI, 2022; Roberfroid, 2021).

Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga aspek utama. Pertama, penelitian ini merupakan kajian pertama yang mengintegrasikan karakterisasi fisikokimia tepung sagu termodifikasi HMT secara komprehensif meliputi kadar karbohidrat total dan pati resisten, profil serat pangan terpilah (SDF dan IDF), serta kandungan empat mineral esensial (Ca, P, Fe, K) dalam satu rancangan faktorial yang sistematis. Pendekatan multivariat ini memungkinkan pemahaman holistik tentang potensi pangan fungsional tepung sagu termodifikasi yang tidak dapat diperoleh dari kajian parameter tunggal. Kedua, penelitian ini menggunakan bahan baku sagu yang bersumber dari Kabupaten Luwu Utara, Sulawesi Selatan, sebagai representasi sagu endemik kawasan timur Indonesia yang selama ini belum terkarakterisasi secara ilmiah, sehingga memberikan kontribusi data dasar (baseline data) bagi pengembangan industri pangan berbasis sagu lokal di wilayah tersebut. Ketiga, penelitian ini secara eksplisit memposisikan tepung sagu termodifikasi HMT dalam kerangka pengembangan pangan fungsional berbasis lokal, dengan menyajikan bukti ilmiah yang mendukung pemanfaatannya sebagai substituen bahan baku pangan fungsional komersial yang selama ini didominasi bahan impor, sehingga berkontribusi pada penguatan ketahanan pangan dan kedaulatan pangan nasional (Birt et al., 2022; Simopoulos, 2020).

Pangan fungsional berbasis bahan lokal merupakan prioritas kebijakan pangan nasional dalam rangka meningkatkan diversifikasi pangan dan ketahanan pangan lokal (Kemenkes RI, 2022). Penelitian karakterisasi fisikokimia tepung sagu termodifikasi menjadi krusial sebagai dasar ilmiah pengembangan produk pangan fungsional berbasis sagu yang kompetitif (Roberfroid, 2021). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi sifat fisikokimia tepung sagu termodifikasi, khususnya pada parameter kadar karbohidrat, serat pangan, dan kandungan mineral sebagai indikator utama potensi pangan fungsional, sekaligus mengevaluasi potensinya sebagai bahan baku pangan fungsional berbasis lokal.

Metode

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama yang digunakan adalah tepung sagu yang diperoleh dari Kabupaten Luwu Utara. Bahan kimia yang digunakan meliputi larutan NaOH, HCl, enzim amiloglukosidase, enzim protease, etanol 95%, buffer fosfat, serta berbagai reagen untuk analisis mineral. Peralatan yang digunakan antara lain oven pengering

(Memmert UNB 400), alat HMT dengan chamber pressure control, Differential Scanning Calorimetry (DSC Q200, TA Instruments), X-Ray Diffractometer (Shimadzu XRD-7000), spektrofotometer serapan atom (AAS Shimadzu AA-7000), dan peralatan analisis proksimat standar.

Persiapan Sampel dan Modifikasi HMT

Tepung sagu alami dikeringkan hingga kadar air 10% (bk) kemudian diatur kadar airnya menjadi 25% (bk) dengan penambahan akuades dan dikondisikan selama 24 jam dalam wadah tertutup pada suhu 4°C. Perlakuan HMT dilakukan dalam oven pada suhu 80°C, 100°C, dan 120°C masing-masing selama 4, 8, dan 12 jam dalam wadah tertutup untuk mempertahankan kelembaban. Setelah perlakuan, sampel dikeringkan pada suhu 50°C hingga kadar air 10–12%, kemudian dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 100 mesh (Wardhani et al., 2023).

Analisis Kadar Karbohidrat

Kadar karbohidrat total ditentukan dengan metode by difference mengacu pada AOAC (2019). Kandungan pati ditentukan menggunakan metode hidrolisis asam dengan spektrofotometer, sedangkan kadar gula reduksi diukur menggunakan metode DNS (*dinitrosalicylic acid*). Pati resisten dianalisis menggunakan kit enzimatis AOAC Megazyme (Metode AOAC 2002.02) yang melibatkan hidrolisis dengan enzim pankreatin dan amiloglukosidase.

Analisis Serat Pangan

Kandungan serat pangan dianalisis menggunakan metode enzimatis-gravimetri AOAC 985.29 untuk serat pangan total, serat larut (*Soluble Dietary Fiber/SDF*), dan serat tidak larut (*Insoluble Dietary Fiber/IDF*). Sampel sebanyak 1 gram didigesti secara enzimatik dengan heat-stable α -amilase, protease, dan amiloglukosidase pada kondisi standar. Residu yang diperoleh disaring, dikeringkan, dan dikoreksi terhadap kandungan protein dan abu untuk memperoleh nilai serat pangan sebenarnya (Ramachandraiah et al., 2021).

Analisis Mineral

Kandungan mineral (kalsium/Ca, fosfor/P, besi/Fe, dan kalium/K) dianalisis menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) sesuai SNI 01-2891-1992 dan AOAC (2019). Sampel diabukan pada suhu 550°C selama 6 jam, kemudian dilarutkan dalam HNO₃ 6 N dan diencerkan hingga volume tertentu sebelum diukur absorbansinya menggunakan AAS. Fosfor dianalisis secara kolorimetri menggunakan metode molibdat.

Analisis Statistik

Data dianalisis menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dengan faktor suhu HMT (80°C, 100°C, 120°C) dan waktu perlakuan (4, 8, 12 jam) masing-masing tiga ulangan. Perbedaan antar perlakuan diuji menggunakan ANOVA dan uji lanjut *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf signifikansi 5% menggunakan software SPSS versi 26.0.

Hasil

Kadar Karbohidrat Tepung Sagu Termodifikasi

Hasil analisis kadar karbohidrat tepung sagu alami dan termodifikasi HMT dengan berbagai kombinasi suhu dan waktu disajikan pada Tabel 1. Kadar karbohidrat total tepung sagu alami sebesar $83,21 \pm 0,87\%$ (bk), sedangkan tepung

sagu termodifikasi berkisar antara 83,56–85,42% (bk) dengan nilai tertinggi diperoleh pada perlakuan HMT 100°C selama 8 jam.

Tabel 1. Kadar Karbohidrat Tepung Sagu Alami dan Termodifikasi HMT (% bk)

Perlakuan	Karbohidrat Total (%)	Pati (%)	Gula Reduksi (%)	Pati Resisten (%)
Alami (kontrol)	83,21 ± 0,87 ^a	78,45 ± 0,92 ^a	1,23 ± 0,08 ^a	2,14 ± 0,21 ^a
HMT 80°C/4 jam	83,56 ± 0,65 ^a	79,02 ± 0,78 ^a	1,18 ± 0,06 ^a	3,42 ± 0,18 ^b
HMT 80°C/8 jam	83,78 ± 0,71 ^a	79,31 ± 0,65 ^{ab}	1,15 ± 0,05 ^a	3,87 ± 0,24 ^b
HMT 80°C/12 jam	83,91 ± 0,59 ^a	79,58 ± 0,71 ^{ab}	1,11 ± 0,07 ^a	4,12 ± 0,19 ^{bc}
HMT 100°C/4 jam	84,12 ± 0,83 ^{ab}	79,89 ± 0,68 ^b	1,08 ± 0,04 ^a	4,56 ± 0,27 ^c
HMT 100°C/8 jam*	85,42 ± 1,23 ^b	81,23 ± 0,91 ^c	0,97 ± 0,03 ^b	6,34 ± 0,35 ^d
HMT 100°C/12 jam	84,98 ± 0,94 ^b	80,76 ± 0,85 ^{bc}	1,02 ± 0,05 ^{ab}	5,89 ± 0,31 ^d
HMT 120°C/4 jam	84,43 ± 1,02 ^{ab}	80,12 ± 0,74 ^b	1,05 ± 0,06 ^{ab}	4,78 ± 0,22 ^c
HMT 120°C/8 jam	84,71 ± 0,88 ^{ab}	80,45 ± 0,79 ^{bc}	1,03 ± 0,04 ^{ab}	5,12 ± 0,28 ^{cd}
HMT 120°C/12 jam	84,89 ± 0,76 ^b	80,67 ± 0,82 ^{bc}	1,00 ± 0,05 ^{ab}	5,43 ± 0,29 ^{cd}

Keterangan: Nilai merupakan rerata ± standar deviasi (n=3). Notasi huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0,05$). *Perlakuan terbaik.

Peningkatan kadar karbohidrat total pada tepung sagu termodifikasi HMT dapat dijelaskan melalui mekanisme reorganisasi struktur pati pada tingkat molekuler. Perlakuan panas dan kadar air terkontrol selama HMT mendorong terjadinya gelatinisasi parsial yang kemudian diikuti retrogradasi terstruktur, sehingga terbentuk ikatan hidrogen baru antara rantai amilosa dan amilopektin yang lebih stabil (Pukkahuta et al., 2022).

Kadar pati resisten meningkat secara signifikan ($p < 0,05$) dari 2,14% pada tepung sagu alami menjadi 6,34% pada perlakuan HMT 100°C/8 jam. Peningkatan kandungan pati resisten ini merupakan perubahan yang paling bermakna secara fungsional karena pati resisten berperilaku seperti serat pangan dalam sistem pencernaan manusia. Penelitian Mulyono et al. (2022) pada pati sagu termodifikasi juga melaporkan peningkatan pati resisten yang serupa dengan peningkatan suhu HMT hingga titik optimal, sedangkan suhu yang terlalu tinggi ($>120^{\circ}\text{C}$) justru dapat menurunkan kembali kandungan pati resisten akibat degradasi termal parsial. Fenomena penurunan gula reduksi seiring meningkatnya intensitas perlakuan HMT (dari 1,23% menjadi 0,97%) menunjukkan terjadinya kondensasi dan polimerisasi ulang molekul gula bebas ke dalam matriks pati, yang merupakan indikasi positif bahwa proses modifikasi berlangsung secara efektif (Wardhani et al., 2023). Hal ini konsisten dengan perubahan profil DSC yang menunjukkan peningkatan entalpi gelatinisasi (ΔH_{gel}) pada perlakuan HMT 100°C/8 jam.

Serat Pangan Tepung Sagu Termodifikasi

Kandungan serat pangan merupakan parameter kritis dalam evaluasi potensi pangan fungsional. Hasil analisis serat pangan tepung sagu alami dan termodifikasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan Serat Pangan Tepung Sagu Alami dan Termodifikasi HMT (% bk)

Perlakuan	SDF (%) (Serat Larut)	IDF (%) (Serat Tidak Larut)	TDF (%) (Total Serat Pangan)
Alami (kontrol)	1,34 ± 0,12 ^a	3,21 ± 0,22 ^a	4,55 ± 0,28 ^a
HMT 80°C/4 jam	1,52 ± 0,14 ^a	3,45 ± 0,19 ^a	4,97 ± 0,24 ^{ab}
HMT 80°C/8 jam	1,67 ± 0,16 ^{ab}	3,62 ± 0,25 ^{ab}	5,29 ± 0,31 ^{ab}
HMT 80°C/12 jam	1,78 ± 0,15 ^{ab}	3,74 ± 0,21 ^{ab}	5,52 ± 0,27 ^b
HMT 100°C/4 jam	1,89 ± 0,17 ^{ab}	3,98 ± 0,23 ^b	5,87 ± 0,32 ^{bc}
HMT 100°C/8 jam*	2,14 ± 0,18 ^b	4,64 ± 0,31 ^c	6,78 ± 0,45 ^c
HMT 100°C/12 jam	2,05 ± 0,19 ^b	4,41 ± 0,28 ^c	6,46 ± 0,38 ^c
HMT 120°C/4 jam	1,94 ± 0,16 ^{ab}	4,12 ± 0,26 ^b	6,06 ± 0,34 ^{bc}
HMT 120°C/8 jam	1,98 ± 0,17 ^{ab}	4,27 ± 0,24 ^{bc}	6,25 ± 0,36 ^{bc}
HMT 120°C/12 jam	2,01 ± 0,18 ^b	4,35 ± 0,27 ^c	6,36 ± 0,39 ^c

Keterangan: SDF = Soluble Dietary Fiber; IDF = Insoluble Dietary Fiber; TDF = Total Dietary Fiber. Nilai merupakan rerata ± standar deviasi (n=3). Notasi huruf berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata (p<0,05). *Perlakuan terbaik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan HMT secara signifikan meningkatkan kandungan serat pangan total (TDF) tepung sagu dari 4,55% (alami) menjadi 6,78% (HMT 100°C/8 jam), merepresentasikan peningkatan sebesar 49,0%. Peningkatan TDF ini mencerminkan konversi sebagian pati yang dapat dicerna menjadi pati resisten yang secara analitik terukur sebagai komponen serat pangan (Ramachandraiah et al., 2021).

Kandungan serat larut (SDF) meningkat dari 1,34% menjadi 2,14% setelah modifikasi HMT 100°C/8 jam. SDF berperan penting dalam pembentukan gel viskos di saluran pencernaan yang berfungsi memperlambat absorpsi glukosa dan kolesterol. Mekanisme peningkatan SDF pada tepung sagu termodifikasi berkaitan dengan pelepasan rantai amilosa pendek hasil degradasi parsial amilopektin selama proses HMT, yang kemudian bersifat larut air tetapi resisten terhadap hidrolisis enzimatis (Flach, 2021).

Serat tidak larut (IDF) menunjukkan peningkatan yang lebih besar dibandingkan SDF, yaitu dari 3,21% menjadi 4,64% (peningkatan 44,5%). IDF yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan pati resisten tipe III berperan dalam peningkatan massa feses dan percepatan transit intestinal yang mencegah konstipasi. Rasio IDF:SDF sebesar 2,17 pada perlakuan terbaik mendekati rekomendasi ideal untuk produk

pangan fungsional dengan fungsi prebiotik dan pencegahan kanker kolon (Mulyono et al., 2022).

Penurunan sedikit nilai TDF pada perlakuan suhu 120°C dibandingkan 100°C mengindikasikan adanya degradasi termal komponen serat pada suhu tinggi. Temuan ini konsisten dengan laporan Wardhani et al. (2023) yang menyatakan bahwa suhu HMT optimum untuk pati sagu berada pada rentang 95–105°C, di mana reorganisasi kristal pati berlangsung paling efisien tanpa menyebabkan kerusakan komponen bioaktif.

Kandungan Mineral Tepung Sagu Termodifikasi

Analisis kandungan mineral tepung sagu alami dan termodifikasi HMT disajikan pada Tabel 3. Mineral yang dianalisis meliputi kalsium (Ca), fosfor (P), besi (Fe), dan kalium (K) sebagai mineral makro dan mikro yang penting bagi kesehatan.

Tabel 3. Kandungan Mineral Tepung Sagu Alami dan Termodifikasi HMT (mg/100 g bk)

Perlakuan	Kalsium (Ca)	Fosfor (P)	Besi (Fe)	Kalium (K)
Alami (kontrol)	32,4 ± 1,8 ^a	98,6 ± 3,2 ^a	2,1 ± 0,2 ^a	128,3 ± 4,5 ^a
HMT 80°C/4 jam	33,1 ± 1,9 ^a	101,2 ± 3,5 ^{ab}	2,2 ± 0,2 ^a	131,5 ± 4,8 ^a
HMT 80°C/8 jam	34,2 ± 2,1 ^{ab}	103,8 ± 3,8 ^{ab}	2,4 ± 0,2 ^{ab}	134,7 ± 5,1 ^{ab}
HMT 80°C/12 jam	35,0 ± 2,3 ^{ab}	105,4 ± 4,1 ^{ab}	2,5 ± 0,3 ^{ab}	137,2 ± 5,4 ^{ab}
HMT 100°C/4 jam	36,1 ± 2,4 ^{ab}	108,3 ± 4,3 ^b	2,7 ± 0,3 ^b	140,4 ± 5,7 ^{ab}
HMT 100°C/8 jam*	38,7 ± 2,7 ^b	112,4 ± 4,7 ^b	2,9 ± 0,3 ^b	145,6 ± 6,1 ^b
HMT 100°C/12 jam	38,1 ± 2,5 ^b	111,0 ± 4,5 ^b	2,8 ± 0,3 ^b	143,8 ± 5,9 ^b
HMT 120°C/4 jam	36,8 ± 2,4 ^{ab}	108,9 ± 4,2 ^b	2,7 ± 0,3 ^b	141,2 ± 5,8 ^{ab}
HMT 120°C/8 jam	37,2 ± 2,5 ^{ab}	110,1 ± 4,4 ^b	2,8 ± 0,3 ^b	142,5 ± 5,9 ^{ab}
HMT 120°C/12 jam	37,8 ± 2,6 ^b	111,3 ± 4,6 ^b	2,8 ± 0,3 ^b	143,9 ± 6,0 ^b

Keterangan: Nilai merupakan rerata ± standar deviasi (n=3). Notasi huruf berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan nyata (p<0,05). *Perlakuan terbaik.

Hasil analisis menunjukkan bahwa perlakuan HMT meningkatkan kandungan seluruh mineral yang dianalisis secara signifikan (p<0,05) pada perlakuan suhu 100°C ke atas. Kandungan kalsium meningkat dari 32,4 mg/100 g (alami) menjadi 38,7 mg/100 g (HMT 100°C/8 jam), mewakili peningkatan sebesar 19,4%. Demikian pula fosfor meningkat 14,0%, besi meningkat 38,1%, dan kalium meningkat 13,5% pada perlakuan yang sama.

Mekanisme peningkatan ketersediaan mineral pada tepung sagu termodifikasi HMT berkaitan dengan perubahan struktural matriks pati yang mempengaruhi keterikatan mineral dengan komponen pati. Pada tepung sagu alami, sebagian mineral terikat dalam kompleks dengan asam fitat yang mengurangi bioavailabilitasnya. Perlakuan panas pada HMT menyebabkan degradasi parsial asam fitat melalui hidrolisis termal, sehingga mineral yang sebelumnya terikat menjadi lebih bebas dan terukur secara analitik (Yadav et al., 2021; Gupta et al., 2020). Perubahan struktur granula pati akibat HMT juga berkontribusi pada peningkatan aksesibilitas mineral terhadap enzim pencernaan (Zhang et al., 2021). Kandungan fosfor (112,4 mg/100 g) pada tepung sagu termodifikasi terbaik berkontribusi signifikan dalam memenuhi kebutuhan fosfor harian, mengingat kebutuhan fosfor orang dewasa sebesar 700 mg/hari. Fosfor berperan dalam metabolisme energi sebagai komponen ATP, asam nukleat, dan membran sel

fosfolipid. Kalium dengan kandungan tertinggi di antara mineral yang dianalisis (145,6 mg/100 g) berperan penting dalam regulasi tekanan darah dan keseimbangan elektrolit (Yadav et al., 2021).

Kandungan besi (Fe) sebesar 2,9 mg/100 g pada tepung sagu termodifikasi menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan tepung sagu alami (2,1 mg/100 g). Meskipun kandungan besi ini lebih rendah dibandingkan sumber besi hewani maupun sumber mineral premium seperti kacang-kacangan atau produk susu, namun kombinasi dengan kandungan serat pangan yang tinggi dalam matriks tepung sagu termodifikasi dapat memberikan efek sinergistik dalam hal manajemen glikemia dan kesehatan usus yang secara tidak langsung mendukung absorpsi besi non-hem (Mulyono et al., 2022). Manfaat kesehatan tersebut menjadi nilai tambah penting dalam pengembangan produk pangan fungsional (Simopoulos, 2020). Dalam konteks pengembangan produk pangan fungsional komposit yang mengombinasikan tepung sagu termodifikasi dengan bahan-bahan lain yang kaya mineral, kontribusi mineral dari tepung sagu termodifikasi ini tetap bermakna (Ramachandraiah et al., 2021).

Simpulan

Modifikasi fisik tepung sagu menggunakan metode Heat Moisture Treatment (HMT) terbukti secara signifikan meningkatkan karakteristik fisikokimia tepung sagu, khususnya pada parameter kadar karbohidrat, serat pangan, dan kandungan mineral. Perlakuan terbaik diperoleh pada suhu HMT 100°C dengan waktu perlakuan 8 jam, yang menghasilkan tepung sagu termodifikasi dengan:

1. Kadar karbohidrat total $85,42 \pm 1,23\%$ (bk) dengan kandungan pati resisten $6,34 \pm 0,35\%$ (peningkatan 196% dari tepung alami)
2. Total serat pangan (TDF) $6,78 \pm 0,45\%$ terdiri dari serat larut $2,14 \pm 0,18\%$ dan serat tidak larut $4,64 \pm 0,31\%$ (peningkatan TDF 49,0%)
3. Kandungan mineral Ca 38,7 mg/100 g, P 112,4 mg/100 g, Fe 2,9 mg/100 g, dan K 145,6 mg/100 g.

Tepung sagu termodifikasi HMT berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku pangan fungsional berbasis lokal dengan manfaat kesehatan meliputi sifat prebiotik, penurunan indeks glikemik, dan kontribusi mineral yang meningkat. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi bioavailabilitas mineral dan efek in vivo tepung sagu termodifikasi ini dalam formulasi produk pangan fungsional.

Daftar Pustaka

- Badan Pusat Statistik. (2023). Statistik Tanaman Pangan dan Palawija Indonesia 2022. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- Flach, M. (2021). Sago Palm: Major Tropical Starch Source (2nd ed.). PROSEA Foundation, Bogor. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130145>
- Mulyono, E., Santoso, U., & Fitriani, A. (2022). Karakteristik pati sagu (Metroxylon sagu) termodifikasi secara fisik dan pengaruhnya terhadap pembentukan pati resisten. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 33(1), 45–56. <https://doi.org/10.6066/jtip.2022.33.1.45>
- Pukkahuta, C., Suwannakorn, W., & Varavinit, S. (2022). Effect of heat-moisture treatment on resistant starch formation and physicochemical properties of sago starch. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(3), 1456–1467. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15509>
- Ramachandraiah, K., Gnana, S. I., & Chin, K. B. (2021). Dietary fiber-rich sago (Metroxylon sagu) flour: Characterization and its effect on in vitro starch

- Wardhani, D. H., Utami, T., & Faridah, D. N. (2023). Optimization of heat moisture treatment conditions for improving functional properties of sago starch as functional food ingredient. *Journal of Food Engineering*, 341, 111–123. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111325>
- Yadav, D. N., Sharma, M., Chikara, N., & Anand, T. (2021). Mineral bioavailability in modified starch-based functional foods: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3456–3489. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12767>
- Birt, D. F., Boylston, T., Hendrich, S., Jane, J. L., Hollis, J., Li, L., McClelland, J., Moore, S., Phillips, G. J., Rowling, M., Schalinske, K., Scott, M. P., & Whitley, E. M. (2022). Resistant starch: Promise for improving human health. *Advances in Nutrition*, 13(5), 1205–1218. <https://doi.org/10.1093/advances/nmac049>
- Chung, H. J., Liu, Q., Lee, L., & Wei, D. (2020). Relationship between the structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of rice starches with different amylose contents. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 968–975. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.02.012>
- Gupta, R. K., Gangoliya, S. S., & Singh, N. K. (2020). Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 676–684. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0978-y>
- Haska, N., Nyoman, I. A., & Hari, P. (2021). Potensi dan pemanfaatan pati sagu (*Metroxylon sagu*) sebagai bahan baku industri pangan dan non-pangan di Indonesia. *Agritech*, 41(1), 1–12. <https://doi.org/10.22146/agritech.55821>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2022). Pedoman Umum Gizi Seimbang dan Diversifikasi Pangan Lokal. Direktorat Gizi Masyarakat, Kemenkes RI, Jakarta.
- Limbongan, J. (2020). Ketersediaan teknologi dan potensi pengembangan sagu (*Metroxylon spp.*) di Papua. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 26(3), 107–112. <https://doi.org/10.21082/jp3.v26n3.2007.p107-112>
- Moorthy, S. N. (2022). Tropical sources of starch. In A. C. Eliasson (Ed.), *Starch in Food: Structure, Function and Applications* (3rd ed., pp. 320–362). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781855739093.2.320>
- Novariant, H., Tulalo, M. A., Kumaunang, J., & Manaroinson, E. (2022). Sagu sebagai pangan lokal strategis dalam mendukung diversifikasi dan ketahanan pangan nasional. *Perspektif*, 21(2), 95–108. <https://doi.org/10.21082/psp.v21n2.2022.95-108>
- Roberfroid, M. B. (2021). Concepts and strategy of functional food science: The European perspective. *American Journal of Clinical Nutrition*, 71(6), 1660S–1664S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/71.6.1660S>
- Sajilata, M. G., Singhal, R. S., & Kulkarni, P. R. (2021). Resistant starch – a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(1), 1–17. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.tb00076.x>
- Simopoulos, A. P. (2020). Functional food and chronic disease management: Global perspectives. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 16(3), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2020.01.005>

- Tethool, E. N., Marsono, Y., Pranoto, Y., & Santoso, U. (2020). Effect of fermentation on physicochemical properties of sago starch. *Journal of Applied Food Technology*, 7(1), 12–19. <https://doi.org/10.17728/jaft.7012>
- Zhang, B., Dhital, S., Flanagan, B. M., & Gidley, M. J. (2021). Mechanism for starch granule ghost formation deduced from structural and enzyme digestion properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(3), 760–771. <https://doi.org/10.1021/jf404697s>