



Optimasi *Breakfast Meal Flakes* Berbasis Tepung Jali Termodifikasi

[*Optimization of Breakfast Meal Flakes based on Modified Jali Flour*]

Lufi Karisma Rahmawati¹⁾, Tjahja Muhandri^{2,3)*}, Ade Chandra Iwansyah⁴⁾, Nurheni Sri Palupi²⁾, dan Karsi Ambarwati²⁾

¹⁾ Program Studi Ilmu Pangan, Sekolah Pascasarjana, IPB University, Bogor, Indonesia

²⁾ Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, Bogor, Indonesia

³⁾ South-East Asia Food & Agricultural Science and Technology (SEAFST) Center, IPB University, Bogor, Indonesia

⁴⁾ Pusat Riset Teknologi dan Proses Pangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Yogyakarta, Indonesia

Received May 6th 2024 / Revised November 5th 2024 / Accepted December 18th 2024

ABSTRACT

Jali (Coix lacryma-jobi L.) is a promising food crop in Indonesia, but its contribution to food security needs more improvement. This research aimed to analyze physico-chemical characteristics of native jali flour and its modified flour after treated by heat moisture treatment (HMT) and autoclaving-cooling (AC) method, and finally observe their effects on breakfast meal flakes (BMF). Both native and treated flour were analyzed for degree of whiteness, swelling power, solubility, water absorption index (WAI), water holding capacity (WHC), and gelatinization profile. HMT-modified jali flour exhibited solubility of 7.77%, gelatinization temperature of 74.95 °C, and peak viscosity of 3255 cP while amylose and resistant starch content reached 20.50% and 6.27%, respectively. Meanwhile, AC-modified jali flour showed lower solubility (4.13%), higher gelatinization temperature (76.15 °C), peak viscosity of 3220 cP, with amylose content of 22.30% and significantly higher resistant starch content (13.93%). Due to its superior resistant starch content, AC-modified Jali flour was selected for BMF formulation. The formulation was optimized through D-optimal with independent variables of 50–100% jali flour and 0–50% sorghum flour. As a result, the optimum formulation was obtained with a desirability value of 0.713, consisted of 100% jali flour without added sorghum flour. The optimized BMF had resistant starch 11.46%, rehydration capacity 58.48%, and hardness 415.12 gf. The product has the potential to diversify healthy breakfast options for community and may contribute to diabetes prevention.

Keywords: breakfast meal flakes, modified jali flour, optimization, resistant starch

ABSTRAK

Jali (*Coix lacryma-jobi L.*) merupakan tanaman pangan yang berpotensi di Indonesia tetapi kontribusinya untuk ketahanan pangan masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik fisiko-kimia tepung jali *native*, tepung termodifikasi menerapkan metode pengolahan *heat moisture treatment* (HMT), dan termodifikasi dengan *autoclaving-cooling* (AC) agar dapat menentukan formula optimum untuk produksi *breakfast meal flakes* (BMF) berbasis tepung jali. Metode penelitian meliputi pembuatan tepung jali *native* dan tepung jali termodifikasi menggunakan proses HMT atau AC. Tepung jali *native* sebagai kontrol perlakuan dan sampel tepung termodifikasi dianalisis derajat putih, *swelling power*, kelarutan, *water absorption index* (WAI), *water holding capacity* (WHC), dan profil gelatinisasinya. Tepung jali termodifikasi HMT memiliki karakter fisik kelarutan 7,77%, suhu gelatinisasi 74,95 °C, dan viskositas puncak 3255 cP. Tepung HMT mengandung amilosa 20,50% dan pati resisten 6,27%. Tepung jali termodifikasi AC memiliki karakter fisik berbeda yaitu kelarutan 4,13%, suhu gelatinisasi 76,15 °C, dan viskositas puncak 3220 cP dengan kandungan amilosa 22,30% dan pati resisten 13,93%. Tepung jali termodifikasi AC menjadi tepung dipilih untuk optimasi BMF yang dirancang mengandung kadar pati resisten maksimum 13,93%. Optimasi formula BMF menggunakan *D-optimal* dengan variabel bebas tepung jali AC 50–100% dan tepung sorgum 0–50% menghasilkan formula optimum dengan nilai *desirability* 0,713 diperoleh dari 100% tepung jali tanpa penambahan tepung sorgum. BMF yang diperoleh memiliki pati resisten sebesar 11,46%, nilai daya rehidrasi sebesar 58,48%, dan *hardness* sebesar 415,12 gf. Produk BMF berbasis tepung jali AC diharapkan dapat menjadi ragam pilihan pangan sarapan bagi masyarakat dalam mencegah penyakit diabetes.

Kata kunci: breakfast meal flakes, modifikasi tepung jali, optimasi, pati resisten

*Penulis Korespondensi: E-mail: tjahjamuhandri@apps.ipb.ac.id

PENDAHULUAN

Jali (*Coix lacryma-jobi* L.) merupakan tanaman sereal yang memiliki potensi dalam pengembangan sumber pangan alternatif di Indonesia. Jali juga memiliki senyawa bioaktif yaitu *coixenolide* dan *coixin* sebagai antikanker. Pengolahan jali sebagai produk pangan masih terbatas, umumnya dijadikan tepung pada bahan baku pembuatan produk *bakery* (Masyitha *et al.*, 2021). Pemanfaatan tepung jali saat ini masih sebagai bahan substitusi karena mengandung amilosa yang rendah (11%), sehingga pasta yang dihasilkan bersifat lengket (Herverly *et al.*, 2020). Oleh karena itu dibutuhkan modifikasi tepung jali dengan karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan produk, salah satunya dengan modifikasi secara fisikokimia untuk meningkatkan proporsi amilosa dan pati resisten (Marta *et al.*, 2022). Penggunaan tepung dengan tinggi amilosa mampu memberikan tekstur renyah pada suatu produk (Muliani *et al.*, 2023).

Heat moisture treatment (HMT) merupakan modifikasi fisik pati melibatkan kadar air terbatas (10–30%), di atas suhu gelatinisasi (80–120 °C) dalam waktu tertentu (Fonseca *et al.*, 2021). Proses HMT menyebabkan perubahan karakteristik fisik pada pati di antaranya profil gelatinisasi, struktur granula pati, viskositas dan meningkatkan amilosa (Ariyantoro *et al.*, 2020; Syafutri *et al.*, 2020). Modifikasi fisik lainnya dapat menggunakan metode *autoclaving-cooling* (AC) dengan memaparkan pati pada kadar air terbatas (25%) lalu memanaskannya di atas suhu 100 °C menggunakan autoklaf selama 15 menit, kemudian mendinginkannya pada suhu 5 °C selama 24 jam (Yuliwardi *et al.*, 2014; Baby *et al.*, 2016). Manfaat lain yang dapat diperoleh dengan modifikasi AC yakni mampu meningkatkan kadar pati resisten. Jenis pati ini adalah fraksi pati yang tidak dapat dicerna oleh enzim pencernaan di usus halus sehingga diteruskan ke usus besar untuk difermentasi oleh bakteri (Hamidah *et al.*, 2019). Beberapa studi memperlihatkan perlakuan HMT dan AC yang diaplikasikan pada kelompok pangan tinggi karbohidrat seperti sereal (beras, jagung, sorgum, *millet*), mampu meningkatkan pati resisten. Produk pangan yang mengandung tinggi pati resisten dapat menurunkan indeks glikemik (IG) produk pangan tersebut (Aini *et al.*, 2021).

Breakfast meal flakes (BMF) adalah opsi pangan saat sarapan yang populer dan disukai karena tekstur, rasa, umur simpan, serta kemudahannya untuk disajikan (Lemmens *et al.*, 2021). Produk BMF dapat dikonsumsi secara langsung maupun disajikan dengan susu atau yogurt. Metode utama yang dilakukan dalam proses pembuatan BMF pada dasarnya dengan menggunakan prinsip pengepresan dan pengeringan. Saat ini produk BMF umumnya terbuat dari beras, gandum, jagung, dan *millet* (Nuriana *et al.*, 2019). Penelitian produk BMF belum banyak dilaku-

kan. Tujuan pada penelitian ini yaitu menganalisis karakteristik fisikokimia tepung jali termodifikasi dengan metode HMT dan AC, serta mendapatkan formula optimum *breakfast meal flakes* berbasis jali termodifikasi.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan utama pada penelitian ini yaitu bebijian jali (*Coix lacryma-jobi* L.) varietas Mayuen. Optimasi BMF dilakukan dengan menggunakan dua jenis tepung yaitu tepung jali terpilih dan sorgum varietas *Biogulma*. Bahan untuk pengujian yang digunakan di antaranya, reagen kimia kualitas proanalysis (Merck, Jerman) standar pati, standar amilosa, etanol, NaOH, larutan Luff Schorl, dan asam asetat; *Resistant Starch* kit (Megazyme, Irlandia); larutan KI-lod, dan bahan penunjang lainnya.

Pembuatan tepung jali termodifikasi

Proses pembuatan tepung jali termodifikasi HMT mengacu kepada Subroto *et al.* (2019) yang dimodifikasi kadar air dan suhu pemanasannya. Kadar air tepung jali disesuaikan hingga 27%, selanjutnya tepung didinginkan pada suhu 10 °C selama 12 jam. Tepung jali dikemas dengan aluminium foil yang tertutup rapat, lalu dipanaskan pada suhu 110 °C selama 16 jam dalam oven. Tepung jali tersebut selanjutnya dikeringkan hingga kadar air sekitar 10–12%, pada suhu 50 °C. Tepung jali HMT modifikasi ini lalu dihaluskan dan diayak dengan ayakan (ABM Test Sieve, Indonesia) 80 mesh.

Proses pembuatan tepung jali *autoclaving-cooling* (AC) termodifikasi mengacu pada metode Yuliwardi *et al.* (2014). Tepung jali dikondisikan kadar airnya hingga 25%. Tepung dikemas dalam *standing pouch* aluminium foil dan didinginkan pada suhu 5 °C selama 12 jam menggunakan *refrigerator*. Tepung jali selanjutnya dipanaskan pada suhu 121 °C selama 15 menit menggunakan autoklaf. Tepung didinginkan kembali selama 24 jam pada suhu 5 °C. Perlakuan AC dilakukan sebanyak 2 siklus dengan total lama kontak panas yaitu 30 menit dan kontak dingin 48 jam. Tepung dikeringkan 16 jam, pada suhu 60 °C menggunakan oven kemudian dihaluskan dan diayak agar lolos 80 mesh. Selanjutnya ketiga jenis tepung (tepung *native* sebagai kontrol dan kedua tepung modifikasi tersebut) dilakukan pengukuran kadar pati resisten sehingga dapat diketahui tepung dengan kandungan pati resisten tertinggi untuk digunakan dalam optimasi BMF.

Analisis proksimat

Kadar air diujikan dengan metode oven, kadar abu dengan metode gravimetri, kadar protein dengan metode Kjeldahl, dan kadar lemak dengan metode

Soxhlet. Kadar karbohidrat diperoleh dengan metode *by difference*. Analisis proksimat dilakukan berdasarkan metode resmi *Association of Official Analytical chemists* (AOAC) (AOAC, 2012).

Derajat putih

Derajat putih diukur menggunakan alat *Whiteness Meter XT-48BN* (Zhejiang, RRC). Alat terlebih dahulu dikalibrasi dengan meletakkan plat kalibrasi berwarna putih ke dalam cawan sampel menghadap ke atas. Sampel kemudian dimasukkan ke tempat pengukuran dan alat dinyalakan dengan menekan tombol "on". Wadah sampel dimasukkan ke tempat pengukuran sehingga alat menyala dan LED menampilkan nilai derajat putih dari sampel (Ega dan Lopulalan, 2015).

Swelling power dan kelarutan

Swelling power dan kelarutan granula pati ditentukan berdasarkan studi Ee *et al.* (2020). Tepung sebanyak 1 g ditambah dengan akuades hingga volume total 40 mL dalam tabung centrifuge 50 mL. Tabung centrifuge dikocok perlahan dan dipanaskan pada suhu 85 °C dalam penangas air selama 30 menit dengan pengocokan terus-menerus. Tabung centrifuge didinginkan hingga mencapai suhu kamar, selanjutnya disentrifugasi dengan centrifuge (Drawell, RRC) pada kecepatan 520 $\times g$ selama 15 menit. Supernatan dipindahkan ke dalam cawan dan dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 4 jam.

Struktur morfologi granula pati

Serbuk sampel diletakkan pada penampang visualisasi perunggu dengan menggunakan *double-side tape*. Permukaan sampel dilapisi dengan lapisan emas tipis (200 mesh). Sampel dimasukkan ke dalam alat *scanning electron microscope* (SEM) (Hitachi SU3500, Jepang) dengan tegangan 20 kV dan diamati permukaannya. Ukuran partikel pada SEM ditentukan dengan mengukur permukaan partikel secara diagonal dan vertikal sebanyak 4x. Perbesaran yang dilakukan yaitu 10,0; 50,0; dan 500x.

Pembuatan breakfast meal flakes jali

Tahapan pembuatan BMF jali termodifikasi mengacu pada metode Permana dan Putri (2015) dengan modifikasi suhu dan lama pemanggangan di antaranya pencampuran (*mixing*), pengukusan, pembentukan pelet, pembentukan *flake* (*flaking*), dan pemanggangan (*baking*). Pembuatan BMF diawali dengan mencampurkan tepung jali termodifikasi yang terpilih, tepung sorgum (x), dan 2% larutan NaCl (garam dapur). Adonan kemudian diuleni hingga kalis, lalu dikukus. Adonan hasil *mixing* dimasukkan ke dalam *meat grinder* (Fomac, Indonesia), yang memiliki lubang luaran disebut *die*, menjadi untaian pelet. Setelah keluar dari *die*, untaian dipotong

dengan pisau pemotong sehingga dihasilkan *output* pelet berbentuk bulat silinder berukuran 6 cm. Pemimpihan (*flaking*) pelet dilakukan menggunakan pasta *roller* dengan ketebalan 2 mm. Adonan pipih kemudian dicetak menggunakan cetakan kue kering berbentuk oval berukuran 1,5x1 cm. *Flakes* yang dihasilkan merupakan *flakes* basah, yang kemudian dipanggang pada oven pada suhu 200 °C selama 7 menit.

Penentuan faktor, respons terpilih, dan kepentingan pemilihan kondisi kombinasi formula optimum

Faktor optimasi terdiri dari dua variabel bebas, yaitu tepung jali terpilih dan tepung sorgum (Tabel 1). Penentuan faktor diperoleh berdasarkan *trial and error* dan studi literatur. Larutan NaCl 2% ditetapkan sebagai variabel tetap. *Response surface methodology* (RSM) dilakukan dengan menentukan batas atas dan batas bawah, kemudian di-input ke dalam aplikasi *Design Expert 13* (DX 13), model *D-optimal* yang menghasilkan kombinasi faktor pembuatan *flakes* (Tabel 2). Selanjutnya dilakukan pembuatan *flakes* berdasarkan unit-unit percobaan yang ditentukan oleh *software* DX13 model *D-optimal* tersebut.

Tabel 1. Penetapan faktor optimasi *breakfast meal flakes* (BMF)

Table 1. Breakfast meal flakes (BMF) optimization factor determination

Parameter (Parameters)	Minimum (%) (Minimum (%))	Maksimum (%) (Maximum (%))
Tepung jali (Jali flour)	50	100
Tepung sorgum (Sorghum flour)	0	50

Target proporsi tepung jali terpilih untuk memenuhi ketentuan *in range* dari *software* memiliki batas atas 100% dan batas bawah 50% sedangkan tepung sorgum memiliki batas atas 50% dan batas bawah 0%. Skala kepentingan (*importance*) setiap variabel ditentukan untuk mencapai tujuan yang diinginkan, kemudian dilanjutkan tahap verifikasi, dan diperoleh lima kali ulangan untuk pengujian pati resisten (PR), daya rehidrasi (DR), dan *hardness*. Hasil verifikasi selanjutnya dibandingkan dengan nilai respons prediksi berdasarkan *software*. Hasil penelitian terverifikasi jika nilai aktual pengujian respons berada pada kisaran nilai 95% *confident interval* (CI) dan nilai 95% *prediction interval* (PI).

Pati resisten

Kadar pati resisten ditentukan dengan metode AOAC (2002) menggunakan *Resistant Starch Rapid Assay Kit Megazyme*. Sampel 100 mg dimasukkan dalam tabung centrifuge (Eppendorf 5810R, Amerika Serikat), kemudian ditambahkan 3,5 mL natrium

maleat (pH 6,0). Tabung ditempatkan pada *waterbath* (GFL 1002, Jerman) 37 °C selama 5 menit, kemudian ditambah larutan *pancreatic α-amylase/amyloglucosidase* (PAA/AMG) sebanyak 0,5 mL. Tabung diinkubasi selama 4 jam pada *shaker waterbath* (Labtech LSB 045S, Indonesia), selanjutnya ditambahkan 4 mL etanol 95%, disentrifugasi pada kecepatan 4000 rpm selama 10 menit. Supernatan dipisahkan dari endapan, kemudian endapan dibilas sebanyak dua kali dengan penambahan 2 mL etanol 50%. Endapan digunakan dalam pengukuran pati resisten. Endapan ditambahkan dengan 2 mL natrium asetat 1,7 M. Suspensi ditempatkan dalam *shaker waterbath* suhu 4 °C selama 20 menit, kemudian ditambah 8 mL natrium asetat 1 M (pH 3,8) dan 1 mL AMG 3300 U/mL. Suspensi ditempatkan di dalam *waterbath* pada suhu 50 °C selama 3 menit. Supernatan sebanyak 0,1 mL direaksikan dengan 3 mL reagen *glucose oxidase/peroxidase* (GOPOD) dalam tabung reaksi, lalu diinkubasi pada suhu 50 °C selama 20 menit. Supernatan dipindahkan ke dalam labu takar 100 mL dan ditera dengan akuades. Absorbansi diukur dengan UV-VIS spektrofotometer (UV 160, Shimadzu, Jepang) pada panjang gelombang 510 nm.

Daya rehidrasi

Pengujian daya rehidrasi dilakukan menggunakan metode Permana dan Putri (2015). Pengukuran dilakukan dengan menghitung selisih berat *flakes* setelah direndam dalam 100 mL air suhu 25 °C selama 5 menit dengan berat awal *flakes* kering. Nilai daya rehidrasi diperoleh berdasarkan hasil pengurangan yang diperoleh, dibagi dengan berat awal *flakes* sebelum dibasahi kemudian dikalikan 100%.

Hardness

Analisis *hardness* dilakukan menggunakan Texture Analyzer jenis XT2i (Texture Technologies, Amerika Serikat) dengan spesifikasi kecepatan *probe* 1 mm/detik, ukuran *probe* P/0,25s ¼ inch spherical stainless, *trigger auto* 5 g dan *distance* 2,0 mm. Bahan ditekan selama 5 detik hingga terbentuk grafik pada layar komputer. Selanjutnya dilakukan perhitungan tingkat *hardness* bahan. Tingkat *hardness* produk dinyatakan dalam *gram force* (gr) (Gallagher et al., 2004).

Analisis data

Data karakteristik sifat fisik dan kimia tepung jali *native*, termodifikasi HMT, dan termodifikasi AC dianalisis menggunakan uji Analysis of Variance (ANOVA). Selanjutnya dilakukan uji lanjut Duncan (DMRT) pada taraf signifikan 0,05. Data disajikan sebagai rerata persentase kadar dan standar deviasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat fisik tepung jali *native* dan termodifikasi

Derajat putih merupakan parameter untuk menentukan kecerahan warna tepung pada rentang nilai 0–100% (Soeka dan Sulistiani, 2017). Perbedaan warna tepung jali termodifikasi dan tanpa modifikasi ditunjukkan pada Gambar 1. Modifikasi HMT atau AC berpengaruh nyata terhadap derajat putih tepung jali ($p < 0,05$). Derajat putih menurun secara signifikan setelah diberi perlakuan AC dan HMT. Hal tersebut disebabkan oleh reaksi *Maillard* karena interaksi antara protein dengan gula pereduksi menghasilkan warna yang lebih gelap, akibat penggunaan suhu tinggi pada tepung jali termodifikasi HMT atau AC (Subroto et al., 2019).

Tabel 2. Pengukuran respons RSM dari *breakfast meal flakes* (BMF)

Tabel 2. RSM response measurement of the breakfast meal flakes (BMF)

Run	Perlakuan Optimasi (Optimization Treatments)		Hasil Pengukuran Respons (Results of Response Measurement)		
	Tepung Jali (%) (Jali Flour (%))	Tepung Sorgum (%) (Sorghum Flour (%))	PR (%) (RS (%))	DR (%) (RC (%))	Kekerasan (gr) (Hardness (gr))
1	100	0	11.88	62.73	406.58
2	75	25	5.21	49.68	476.24
3	50	50	3.74	51.09	519.78
4	100	0	11.55	56.22	410.36
5	100	0	10.46	56.07	421.39
6	75	25	5.32	50.32	480.32
7	87.5	12.5	6.93	52.54	459.00
8	50	50	3.76	40.87	513.18
9	50	50	3.46	42.98	509.49
10	50	50	3.13	40.91	520.09
11	100	50	12.03	58.02	402.98
12	75	25	5.50	50.55	479.38
13	62.5	37.5	4.00	58.10	502.36

Keterangan: PR= pati resisten, DR= daya rehidrasi

Note: RS= resistant starch, RC= rehydration capacity



Gambar 1. Kenampakan tepung jali: A= native, B= termodifikasi HMT, C= termodifikasi autoclaving-cooling (AC)

Figure 1. Appearance of jali flour: A= native, B= HMT-modified, C= autoclaving-cooling (AC) modified

- A** Swelling power mengindikasikan penyerapan air oleh granula pati sehingga terjadi pertambahan berat, akibatnya granula pati yang mengembang. Modifikasi tepung jali dengan HMT berpengaruh nyata terhadap swelling power ($p < 0,05$) (Tabel 3). Hal tersebut terjadi karena penggunaan suhu tinggi pada proses HMT menyebabkan ikatan hidrogen terputus sehingga mengakibatkan hilangnya gugus hidroksil dan kemampuan pati dalam menahan air berkurang (Bukhori *et al.*, 2019). Sebaliknya, nilai swelling power tepung jali termodifikasi AC meningkat disebabkan oleh pemutusan beberapa ikatan dalam struktur pati akibat tekanan dan suhu yang tinggi pada proses AC, sehingga pati akan lebih mudah membentuk gel saat direhidrasi. Akibat adanya air, suhu yang tinggi dan tekanan mengakibatkan granula pati mengalami kerusakan karena terputusnya ikatan hidrogen. Proses ini dimulai dengan difusi air ke dalam bagian amorf granula, yang menyebabkan hidrasi dan pembengkakan granula pati. Panas akan merusak struktur kristal pada granula dan mengganggu ikatan heliks ganda pati (Bukhori *et al.*, 2019).

- B**
- C** Kelarutan tepung jali termodifikasi HMT (kadar air 10,24%) lebih tinggi dibandingkan dengan tepung jali native, sebaliknya tepung jali termodifikasi AC mengalami penurunan kelarutan ($p < 0,05$). Kenaikan kelarutan pada tepung HMT disebabkan oleh semakin lama waktu pemanasan, maka kelarutan semakin tinggi karena melemahnya ikatan molekul antar molekul pati. Pemanasan yang intens menyebabkan granula pati menjadi terdisintegrasi sehingga air dalam granula pati dan molekul pati yang mudah larut air keluar-masuk dengan mudah ke dalam sistem suspensi. Tepung jali termodifikasi AC dengan kadar air 11,47% secara signifikan mengalami penurunan kelarutan disebabkan proses retrogradasi sehingga terbentuk ikatan hidrogen yang rapat. Produksi pati resisten pada sampel autoclaving-cooling yang merupakan bahan yang tidak dapat larut menyebabkan terjadinya penurunan kelarutan (Novita *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2021).

Tabel 3. Sifat fisik tepung jali native dan termodifikasi

Table 3. Physical properties of native and modified jali flour

Parameter (Parameters)	Tepung Native (Native Flour)	Tepung HMT (HMT Flour)	Tepung AC (AC Flour)
Derajat putih (%) (Whiteness degree (%))	74.00±0.34 ^c	61.28±0.17 ^b	50.57±0.68 ^a
Swelling power (g/g)	6.36±0.62 ^b	5.43±0.12 ^a	7.78±0.06 ^c
Kelarutan (g/g) (Solubility (g/g))	4.37±0.54 ^a	7.33±1.23 ^b	4.13±0.12 ^a
Water absorption index (g/g)	2.04±0.05 ^a	2.23±0.02 ^b	2.63±0.02 ^c
Water holding capacity (%)	3.73±0.07 ^a	3.79±0.15 ^a	3.43±0.01 ^b

Keterangan: Data diperoleh dari rata-rata tiga kali ulangan pada setiap pengujian dengan nilai $\pm$ menunjukkan standar deviasi. HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling. Nilai pada baris yang sama diikuti huruf berbeda menunjukkan beda nyata ($p < 0,05$)

Note: Data represent the mean of three replicates for each test, with $\pm$ indicating the standard deviation. HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling. Values in the same row followed by different letters indicate a significant difference ($p < 0.05$)

Water absorption index (WAI) pada tepung jali termodifikasi HMT atau AC mengalami peningkatan dibandingkan tepung jali *native*. Peningkatan WAI mengindikasikan karakter hidrofilik yang meningkat serta adanya granula pati yang rusak yang dapat menyerap sekitar empat kali lebih banyak air dibandingkan granula pati utuh (Onyango *et al.*, 2013). Tepung jali termodifikasi AC memiliki nilai *water holding capacity* (WHC) secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan HMT maupun *native*. Hal ini menunjukkan bahwa tepung AC memiliki kemampuan untuk menyerap banyak air namun tidak mampu menahan air. Setelah pendinginan, pati kembali mengkristal dan kehilangan kapasitas mempertahankan airnya (Li *et al.*, 2021).

Profil gelatinisasi tepung jali *native* dan termodifikasi

Analisis profil gelatinisasi dilakukan untuk mengetahui indikator khas untuk karakteristik gelasi tepung maupun molekul pati untuk diaplikasikan pada produk pangan serta digunakan untuk menentukan stabilitas bahan (Rasyda *et al.*, 2020). Berdasarkan hasil analisis, terjadi penurunan viskositas puncak (VP) pada tepung jali termodifikasi HMT atau AC (Tabel 4). Penurunan ini dikarenakan oleh perlakuan panas metode HMT atau AC yang menyebabkan penurunan kemampuan penetrasi molekul air selama pengujian profil gelatinisasi ke dalam granula pati setelah tahap pengeringan menjadi tepung. Hal ini mengindikasikan peningkatan kekompakan molekul pati akibat interaksi molekul di daerah amorf dan kristalin setelah tahap pengeringan untuk menjadi tepung. Bukti peningkatan kekompakan dilanjutkan dengan pengamatan mikroskopik elektron. Pada tepung jali termodifikasi AC juga terdapat perlakuan tekanan uap yaitu 1 atm sehingga penurunan nilai VP lebih besar. Pati terpapar pada kondisi hidrotermal serta tekanan tinggi mengakibatkan struktur granular pati terganggu (Subroto *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2010).

Viskositas *breakdown* (VB) pada tepung jali HMT lebih rendah dibandingkan tepung jali *native* (Tabel 4), disebabkan oleh interaksi antara rantai polimer di daerah amorf dan kristal pada perlakuan HMT membuat pati lebih stabil sehingga membutuhkan lebih banyak panas untuk disintegrasi struktural

dan pembentukan pasta (Subroto *et al.*, 2019). Perlakuan AC menurunkan nilai BV tepung jali termodifikasi AC dibandingkan tepung jali *native*. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya pembentukan ikatan amilosa dengan amilosa maupun amilopektin membentuk struktur yang lebih kompak dan stabil (Faridah *et al.*, 2022b). Penurunan BV mengindikasikan struktur butiran pati menjadi lebih kuat sehingga menghambat proses pembengkakan dan hancur, serta menghasilkan stabilitas termal yang baik setelah pemrosesan (Zheng *et al.*, 2020).

Setback viscosity (SV) pada tepung jali termodifikasi HMT menurun (Gambar 2) sejalan dengan penelitian Dudu *et al.* (2019) pada perlakuan HMT terhadap tepung singkong juga penelitian Silitonga *et al.* (2021) terhadap tepung maupun pati jagung termodifikasi AC. Penurunan SV disebabkan oleh adanya granula yang tidak terfragmentasi dalam pasta sehingga membatasi kecenderungan proses retrogradasi (Dudu *et al.*, 2019).

Final viscosity (FV) tepung jali termodifikasi HMT menurun dibandingkan dengan tepung jali *native* (Gambar 2). Penurunan FV disebabkan oleh reorientasi (penataan ulang) interaksi molekul amilopektin dan amilosa pada granula pati semakin kuat, sehingga kecenderungan terjadinya retrogradasi semakin berkurang (Subroto *et al.*, 2019). Hal yang sama terjadi pada tepung jali termodifikasi AC. Pada penelitian Silitonga *et al.* (2021) dengan sampel tepung jagung yang diberi perlakuan AC terjadi penurunan nilai FV. Begitu pula pada penelitian Ashwar *et al.* (2016), terjadi penurunan nilai FV secara signifikan pada pati beras setelah modifikasi AC.

Tepung jali HMT atau AC memiliki *pasting temperature* (PT) yang lebih tinggi dibandingkan dengan tepung jali *native*, disebabkan oleh ikatan intramolekul amilosa dan amilopektin yang semakin kuat sebagai akibat dari peningkatan area kristalin (Gambar 2). Semakin rendah suhu gelatinisasi, maka semakin pendek waktu gelatinisasi (Irhami *et al.*, 2019). Waktu gelatinisasi pada tepung jali termodifikasi HMT atau AC lebih tinggi (6,93 menit) dibandingkan tepung jali *native* (6,20 menit). Waktu gelatinisasi berkorelasi positif dengan suhu gelatinisasi. Waktu gelatinisasi didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan granula pati saat mengalami peningkatan viskositas karena proses gelatinisasi (Parwiyanti *et al.*, 2016).

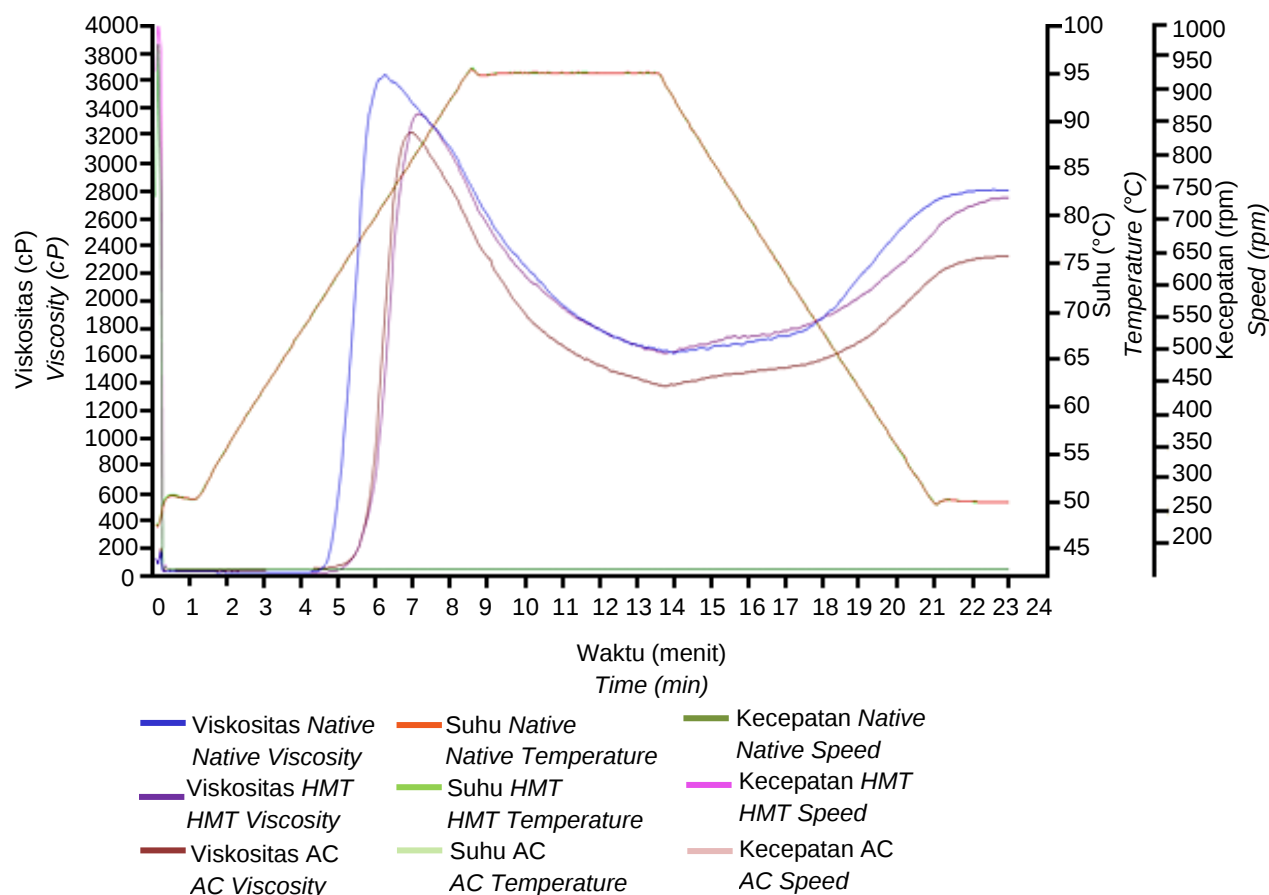
Tabel 4. Profil gelatinisasi tepung jali *native* dan termodifikasi

Table 4. Gelatinization profile of native and modified jali flour

Parameter (Parameters)	Satuan (Units)	Tepung Native (Native Flour)	Tepung HMT (HMT Flour)	Tepung AC (AC Flour)
Viskositas puncak (<i>Peak viscosity</i>)	cP	3637	3255	3220
Viskositas <i>breakdown</i> (<i>Breakdown viscosity</i>)	cP	2022	1858	1848
Viskositas <i>setback</i> (<i>Setback viscosity</i>)	cP	1186	1145	946
Viskositas akhir (<i>Final viscosity</i>)	cP	2801	2542	2318
Waktu gelatinisasi (<i>Pasting time</i>)	min	6.2	6.93	6.93
Suhu gelatinisasi (<i>Pasting temperature</i>)	°C	71.2	74.95	76.15

Keterangan: HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling

Note: HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling



Keterangan: HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling

Note: HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling

Gambar 2. Grafik profil gelatinisasi (RVA) tepung jali *native*, HMT, dan AC
Figure 2. Graph of gelatinization profile (RVA) of native, HMT, and AC jali flour

Struktur morfologi granula pati jali *native* dan termodifikasi

Pengamatan mikroskopik terhadap granula tepung jali *native* (Gambar 3A) dan tepung jali termodifikasi HMT (Gambar 3B) tidak memiliki perbedaan permukaan granula secara signifikan yaitu tidak ada deformasi/kerusakan granula pati yang jelas terlihat setelah modifikasi HMT (Gambar 3B). Hal tersebut disebabkan perlakuan HMT yang diberikan menggunakan kadar air yang terbatas tanpa tekanan uap. Hidrasi yang terbatas menyebabkan tidak terjadinya perubahan morfologi granula tepung (Marta *et al.*, 2022). Tepung jali termodifikasi AC menunjukkan perubahan struktur granula pati yang berbeda yaitu terjadi penurunan integritas fisik berupa lubang pada permukaan granula (Gambar 3C). Partikel granula tepung jali termodifikasi AC mengembang dan mulai terganggu keutuhannya karena masuknya air dan proses pemanasan pada suhu tinggi sehingga berubah keutuhan permukaannya. Proses pendinginan mengakibatkan terjadinya retrogradasi sehingga bentuk kristal tidak beraturan.

Waktu pendinginan memiliki korelasi linier dengan intensitas keretakan pada permukaan granula (Herawati *et al.*, 2020; Faridah *et al.*, 2022a).

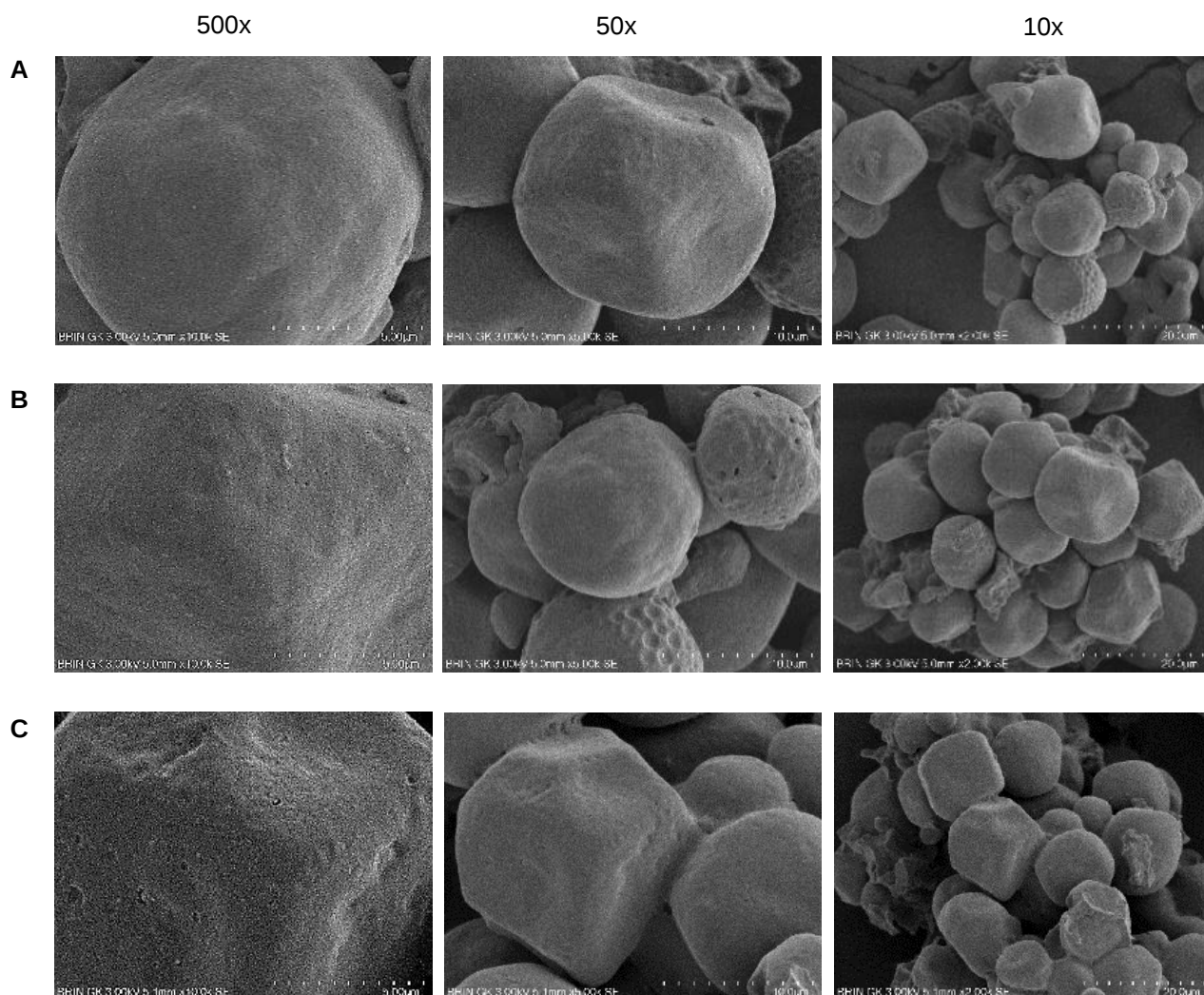
Karakteristik kimia tepung jali *native* dan termodifikasi

Kadar air tepung jali termodifikasi HMT mengalami penurunan (Tabel 6) disebabkan suhu pemanasan yang digunakan saat proses modifikasi selama dua jam, sehingga air yang terikat pada tepung mengalami proses penguapan (Dayu dan Dyna, 2019). Proses pemanasan mengakibatkan ikatan hidrogen yang terdapat di dalam tepung terputus. Sebaliknya, tepung jali AC mengalami peningkatan kadar air. Hal ini dikarenakan dalam proses AC terdapat penambahan air sehingga kadar air dalam tepung AC meningkat. Dibandingkan dengan tepung HMT, tepung AC juga memiliki kadar air yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan durasi pemanasan pada AC lebih rendah dibandingkan dengan HMT, sehingga air yang menguap selama proses pemanasan lebih sedikit dibandingkan HMT. Proses autoklaf

dengan melibatkan panas dan tekanan uap menyebabkan granula pati dalam tepung mengalami imbibisi air dan membengkak. Gelatinisasi pati menghasilkan peningkatan kapasitas penyimpanan air pada tepung. Akibatnya, tepung menahan lebih banyak air setelah proses pendinginan, yang mengarah ke kandungan air yang lebih tinggi (Yuliwardi *et al.*, 2014).

Kadar abu pada tepung jali meningkat setelah perlakuan HMT atau AC dibandingkan dengan tepung jali *native* (Tabel 5). Kadar abu yang tinggi menandakan tinggi pula kandungan mineral suatu bahan (Faridah *et al.*, 2022b). Peningkatan kadar abu tepung jali termodifikasi HMT dan AC disebabkan

oleh perubahan struktur pati dan keberadaan pati resisten dapat menjaga mineral tetap terikat pada bahan pangan. Proses pendinginan pada AC dapat menyebabkan mineral-mineral ini terperangkap pada partikel tepung sehingga kadar abu meningkat (Dayu dan Dyna, 2019). Tepung jali termodifikasi HMT atau AC tidak meningkatkan kadar lemak secara signifikan dibandingkan tepung jali *native* ($p>0,05$) (Tabel 5). Hasil ini sejalan dengan penelitian Xiang *et al.* (2023) tentang tepung beras dan Goel *et al.* (2020) tentang pati *buckwheat* yang diberi perlakuan HMT, yang berpengaruh terhadap komponen lemak baik dalam pati maupun tepung *native*.



Keterangan: HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling

Note: HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling

Gambar 3. Struktur morfologi granula pati jali perbesaran 500, 50, dan 10x tepung jali: A= *native*, B= HMT, C= AC

Figure 3. Morphological structure of jali starch granules at 500, 50, dan 10x magnification: A= *native*, B= HMT, C= AC

Kadar protein pada tepung jali termodifikasi HMT lebih rendah dibandingkan tepung jali *native* (Tabel 5). Pada proses HMT, badan protein mengalami perubahan bentuk dan terdenaturasi. Interaksi yang terjadi antara protein yang terdenaturasi maupun antara protein dan granula pati mengakibatkan terjadinya asosiasi jaringan protein dengan permukaan granula pati (Chen *et al.*, 2015). Sebaliknya, protein pada tepung jali termodifikasi AC mengalami peningkatan. Peningkatan protein disebabkan oleh proses pemanasan pada saat *autoclaving* maupun pengeringan tepung sehingga terjadi penguraian ikatan molekul air. Penguraian molekul air membentuk hidrat dengan molekul-molekul lain yang mengandung atom-atom O dan N seperti protein, sehingga meningkatkan komponen lain seperti kandungan protein (Novita *et al.*, 2023; Tamrin *et al.*, 2023). Pemanasan lebih lanjut menyebabkan rusaknya struktur protein yang mengakibatkan protein mengendap, sehingga lebih banyak nitrogen yang terbaca saat proses analisis.

Kadar karbohidrat yang dihasilkan dari tepung jali *native*, termodifikasi HMT atau AC berturut-turut yaitu 72,82; 74,39; dan 69,36% (Tabel 5). Kadar karbohidrat tepung jali diperoleh dengan pengukuran karbohidrat secara *by difference*. Nilai karbohidrat dihitung berdasarkan selisih 100 % bahan terhadap

komponen lain seperti kadar air, abu, lemak, dan protein.

Total pati, amilosa, amilopektin, dan pati resisten

Tepung jali termodifikasi HMT atau AC mengalami penurunan total pati (Tabel 6). Hal serupa terjadi pada penelitian Putra *et al.* (2023) yaitu tepung singkong yang diberi perlakuan HMT mampu menurunkan kadar total pati. Penelitian Setiarto *et al.* (2018) pada tepung singkong menunjukkan penurunan kadar total pati secara signifikan seiring jumlah siklus AC yang diberikan. Penurunan tersebut disebabkan oleh peningkatan degradasi pati akibat ikatan glikosidik fraksi amilopektin maupun amilosa yang pada saat proses pemanasan HMT maupun AC (Agustina *et al.*, 2016).

Amilosa pada tepung jali termodifikasi HMT atau AC mengalami peningkatan dibandingkan kadar amilosa tepung jali *native* (Tabel 6). Rantai cabang molekul amilopektin terputus di bawah pengaruh suhu dan kelembapan tinggi menyebabkan terbentuknya rantai karbon lurus (Zhang *et al.*, 2023). Modifikasi AC yang berulang dapat meningkatkan pati resisten melalui retrogradasi, sehingga memengaruhi karakteristik gelatinisasi pati (Wang *et al.*, 2019). Amilopektin yang dihasilkan oleh tepung jali termodifikasi HMT atau AC menurun secara signifikan (Tabel 6).

Tabel 5. Data proksimat tepung jali *native* dan termodifikasi

Table 5. Proximate data of native and modified jali flour

Parameter (%) (Parameters (%))	Tepung Native (Native Flour)	Tepung HMT (HMT Flour)	Tepung AC (AC Flour)	SNI (Indonesian Standard)
Kadar air (Moisture content)	11.02±0.25 ^b	10.24±0.17 ^a	11.47±0.16 ^b	Maks. (Max.) 14.5
Kadar abu (Ash content)	0.69±0.02 ^a	0.80±0.01 ^b	1.05±0.01 ^c	Maks. (Max.) 0.70
Lemak (Fat)	1.45±0.01 ^a	1.47±0.30 ^a	1.14±0.16 ^a	-
Protein	12.41±0.15 ^b	11.67±0.38 ^a	15.02±0.35 ^c	Min (Min.) 7.0
Karbohidrat (Carbohydrate)	72.82±0.15 ^b	74.39±0.46 ^c	69.36±0.43 ^a	-

Keterangan: Data diperoleh dari rata-rata tiga kali ulangan pada setiap pengujian dengan nilai ± menunjukkan standar deviasi. HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling. Nilai pada baris yang sama diikuti huruf berbeda menunjukkan beda nyata ($p < 0,05$)

Note: Data represent the mean of three replicates for each test, with ± indicating the standard deviation. HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling. Values on the same line followed by different letters indicate significant differences ($p < 0.05$)

Tabel 6. Total pati, amilosa, amilopektin, dan pati resisten tepung jali *native* dan termodifikasi

Table 6. Starch, amylose, amylopectin, and resistant starch content in native and modified jali flour

Parameter (%bk) (Parameters (%db))	Tepung Native (Native Flour)	Tepung HMT (HMT Flour)	Tepung AC (AC Flour)
Total pati (Total starch)	61.47±1.08 ^c	56.07±0.40 ^b	52.92±0.82 ^a
Amilosa (Amylose)	15.26±0.48 ^a	18.59±0.75 ^b	20.77±0.83 ^b
Amilopektin (Amylopectin)	51.23±0.67 ^c	41.31±0.70 ^b	35.90±1.30 ^a
Pati resisten (Resistant starch)	3.82±0.13 ^a	6.27±0.19 ^b	13.93±0.05 ^c

Keterangan: Data diperoleh dari rata-rata tiga kali ulangan pada setiap pengujian dengan nilai ± menunjukkan standar deviasi. HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling. Nilai pada baris yang sama diikuti huruf berbeda menunjukkan beda nyata ($p < 0,05$)

Note: Data represent the mean of three replicates for each test, with ± indicating the standard deviation. HMT= heat moisture treatment, AC= autoclaving-cooling. Values on the same line followed by different letters indicate significant differences ($p < 0.05$)

Penurunan kadar amilopektin terjadi seiring meningkatnya kadar amilosa. Fraksi amilo-pektin yang lebih tinggi dalam pati lebih sensitif terhadap perlakuan HMT, sehingga mengakibatkan rantai percabangannya semakin pendek (Fang *et al.*, 2023). Mobilitas rantai amilopektin berkurang akibat interaksi amilosa dengan amilopektin (Parwiyanti *et al.*, 2016). Jumlah siklus yang dipakai pada pemanasan AC tidak memberi dampak yang berbeda nyata pada kadar amilopektin. Fraksi amilopektin telah membentuk rantai heliks ganda dengan struktur ikatan yang lebih kompak karena tergelatinisasi dan mengalami retrogradasi secara sempurna (Faozi *et al.*, 2023).

Tepung jali termodifikasi HMT mampu meningkatkan pati resisten (Tabel 6). Peningkatan bagian yang tahan terhadap enzim disebabkan oleh kuatnya hubungan antara rantai molekul dan struktur yang rapat pada granula pati setelah diberikan perlakuan HMT. Kadar pati resisten pada tepung jali termodifikasi AC meningkat dibandingkan dengan tepung jali *native*. Proses rekristalisasi atau retrogradasi pati yang tergelatinisasi, terutama terjadi pada fraksi amilosa yang lebih mudah mengkristal pada saat proses pendinginan yang mengakibatkan pati resisten terbentuk (Yadav *et al.*, 2009).

Hasil analisis respons optimasi

Tepung jali termodifikasi AC merupakan tepung terpilih yang digunakan dalam pembuatan BMF karena memiliki kandungan pati resisten tertinggi. Sebanyak 13 kombinasi rancangan formula yang direkomendasikan *software DX 13* dapat dilihat pada Tabel 2. Setiap kombinasi rancangan formula dianalisis berdasarkan respons PR, DR, dan *hardness*. Setiap respons optimasi dianalisis menggunakan analisis sidik ragam (Tabel 7).

Model yang dipilih untuk keseluruhan respons memiliki nilai signifikansi kurang dari 0,05 mengindikasikan keseluruhan model signifikan terhadap respons sehingga diterima. Seluruh respon pada model memiliki peluang kesalahan kurang dari 5%, yang dinilai dari *lack of fit* yang tidak signifikan ($p > 0,05$). *Lack of fit* tidak signifikan mengindikasikan model yang dipilih adalah model yang memiliki kesesuaian data respons yang baik dan tidak signifikan terhadap ketidaktepatan model.

Hasil analisis respons pati resisten (PR)

Parameter pati resisten pada produk BMF jali termodifikasi AC merupakan indikator penting karena berpengaruh terhadap kualitas produk yang ingin dicapai, yaitu produk yang memiliki indeks glikemik rendah. Persamaan yang digunakan untuk interpretasi respons PR adalah Persamaan 1.

$$PR = 0,11460A - 0,19689B \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan: PR= pati resisten, A= tepung jali termodifikasi AC, B= tepung sorgum

Persamaan yang diperoleh menunjukkan bahwa respon PR dipengaruhi oleh konsentrasi tepung jali termodifikasi AC dan tepung sorgum serta interaksi dari keduanya. Peningkatan nilai PR sangat dipengaruhi oleh faktor konsentrasi tepung jali termodifikasi AC karena memiliki nilai koefisien yang positif. Sebaliknya, penurunan nilai PR dipengaruhi oleh konsentrasi tepung sorgum karena memiliki nilai koefisien yang negatif. Berdasarkan persamaan tersebut dapat dikatakan bahwa BMF yang dibuat dengan konsentrasi tepung jali termodifikasi AC yang lebih tinggi akan meningkatkan nilai PR. Grafik dua dimensi (Gambar 4A) mengindikasikan kombinasi antar komponen tepung jali termodifikasi AC dan tepung sorgum saling memengaruhi nilai PR (terdapat interaksi antagonis).

Hasil analisis respons daya rehidrasi (DR)

Parameter DR menunjukkan seberapa besar kemampuan penyerapan air dalam jumlah besar oleh *flakes* dengan waktu yang relatif singkat (Daniels *et al.*, 2023). DR juga dapat mengindikasikan kapasitas volume yang bisa ditempati oleh air dalam tepung sehingga bisa menunjukkan kemampuan hidrasi suatu bahan. Persamaan 2 digunakan untuk interpretasi respon DR.

$$DR = 0,58481A - 3,81709B \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan: DR= daya rehidrasi, A= tepung jali termodifikasi AC, B= tepung sorgum

Tabel 7 Uji sidik ragam untuk respons percobaan *breakfast meal flakes* (BMF)

Table 7. Test of variance for the experimental response *breakfast meal flakes* (BMF)

Respons (Response)	Model	Signifikansi ($p < 0.05$) (Significance ($p < 0.05$))	Lack of Fit ($p > 0.05$)	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	Adequate Precision
Pati resisten (%) (Resistant starch (%))	Quadratic	<0.0001	0.2436	0.9859	0.9813	0.9678	29.9972
Daya rehidrasi (%) (Rehydration capacity (%))	Cubic	<0.0001	0.1348	0.7593	0.6791	0.3089	6.6600
Hardness (%)	Quadratic	<0.0010	0.3228	0.9847	0.9816	0.9742	35.5779

Daya rehidrasi dapat meningkat seiring bertambahnya penggunaan tepung jali (A), dan akan menurun seiring penambahan tepung sorgum (B). Persamaan 2 menunjukkan bahwa *flakes* yang dibuat dengan konsentrasi tepung jali termodifikasi AC yang lebih tinggi akan meningkatkan nilai DR. Grafik dua dimensi (Gambar 4B) menunjukkan bagaimana kombinasi antar komponen proporsi tepung saling memengaruhi DR (ada interaksi antagonis).

Hasil analisis respon *hardness*

Parameter *hardness* menunjukkan gaya maksimum yang diperlukan untuk mematahkan *flakes* dengan ketinggian tetap (Colque *et al.*, 2023). Persamaan 3 digunakan untuk interpretasi respon *hardness*.

$$\text{Hardness} = 4,11143A + 4,79281B \dots\dots\dots (3)$$

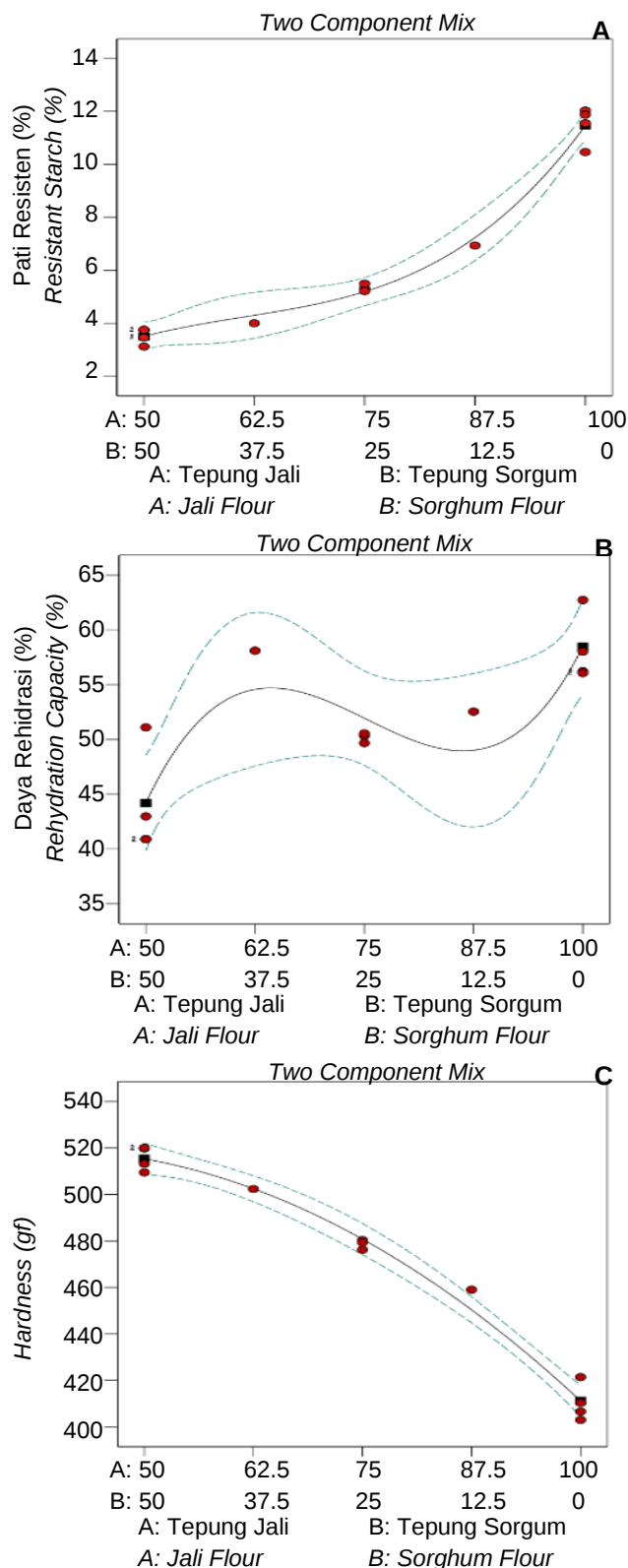
Keterangan: A= tepung jali termodifikasi AC, B= tepung sorgum

Hardness dapat meningkat seiring bertambahnya penggunaan tepung sorgum (B), tetapi menurun seiring penambahan tepung jali termodifikasi AC (A). Respon *hardness* dipengaruhi oleh konsentrasi tepung jali, tepung sorgum dan interaksi dari keduanya sinergis (*amplifying effects*) karena memiliki nilai koefisien yang positif. *Flakes* yang dibuat dengan konsentrasi tepung sorgum yang lebih tinggi akan meningkatkan nilai *hardness*. Grafik dua dimensi (Gambar 4C) menunjukkan kombinasi antar komponen proporsi tepung saling memengaruhi nilai *hardness*.

Hasil optimasi formula dan verifikasi

Proses optimasi dilakukan untuk mendapat formula *flakes* terbaik dengan mengoptimalkan respon yang dianalisis. Formulasi dikatakan optimal jika nilai keinginan (*desirability*) mendekati 1. Kriteria masing-masing variabel dapat dilihat pada Tabel 8.

Target untuk masing-masing bahan yaitu tepung jali termodifikasi AC dan tepung sorgum dirancang "*in range*" karena diharapkan formula yang optimum masih berada pada interval konsentrasi yang digunakan. Target untuk variabel PR kisaran 5–15% dengan skala kepentingan 5 (++++). Hal tersebut dilakukan karena rentang nilai tersebut merupakan kisaran PR kategori tinggi. Variabel DS memiliki target "*maximize*" dengan skala kepentingan 4 (++++). Alasan penetapan target tersebut karena nilai DS yang diharapkan paling tinggi dengan menggunakan pendekatan produk komersial. Parameter *hardness* memiliki target "*in range*" karena diharapkan formula optimum memiliki nilai *hardness* pada interval nilai yang didapatkan.



Gambar 4. Grafik dua dimensi respon pati resisten (A), respon daya rehidrasi (B), dan (C) respon *hardness*

Figure 4. Two-dimensional graphs of resistance starch response (A), rehydration capacity response (B), and (C) hardness response

Formula BMF terpilih memiliki nilai *desirability* 0,713 diperoleh dari 100% tepung jali dan 0% tepung sorgum (Gambar 5). Formula terpilih selanjutnya diverifikasi sebanyak tiga kali untuk melihat kemampuan model untuk memprediksi nilai optimum. Berdasarkan hasil verifikasi, seluruh respons berada pada kisaran nilai 95% CI maupun 95% PI. Hal tersebut menunjukkan formula yang diperoleh memiliki prediksi yang direkomendasikan oleh *software* karena hasil pengujian responsnya sesuai (Tabel 9).

KESIMPULAN

Tepung jali termodifikasi *heat moisture treatment* (HMT) menghasilkan karakter fisik yaitu kelarutan 7,77%, suhu gelatinisasi 74,95 °C, dan viskositas puncak 3255 cP. Karakter kimia tepung HMT yang dihasilkan yaitu amilosa 20,50% dan pati resisten 6,27%. Tepung jali termodifikasi *autoclaving-cooling* (AC) menghasilkan karakter fisik yaitu kelarutan 4,13%, suhu gelatinisasi 76,15 °C, dan viskositas puncak 3220 cP. Karakter kimia tepung HMT yang dihasilkan yaitu amilosa 22,30% dan pati resisten 13,93%.

Tepung jali termodifikasi AC menjadi tepung terpilih untuk diaplikasikan pada optimasi *breakfast meal flakes* (BMF) dengan kadar pati resisten tertinggi yaitu 13,93%. Optimasi formula BMF menggunakan *mixture experiment* menghasilkan formula

optimum dengan nilai *desirability* 0,713, diperoleh pada proporsi tepung jali 100% dan tanpa penambahan tepung sorgum. BMF hasil formulasi optimum hasil verifikasi memiliki nilai pati resisten 11,65%, daya rehidrasi 55,65%, dan *hardness* 415,12 gr. BMF dari formulasi optimal dapat dijadikan opsi pangan sarapan tinggi pati resisten.



Gambar 5. *Breakfast meal flakes* (BMF) berbasis tepung jali termodifikasi *autoclaving-cooling* (AC)

Figure 5. *Breakfast meal flakes* (BMF) based on *autoclaving-cooling* (AC) modified jali flour

Tabel 8. Kriteria penentuan formula *flakes* optimum

Table 8. Criteria for determining the optimum flakes formula

Variabel (Variable)	Target (Goal)	Batas Bawah (Minimum)	Batas Atas (Maximum)	Tingkat Kepentingan (Importance)
Tepung jali AC (%) (Jali flour AC (%))	<i>In range</i>	50	100	3 (+++)
Tepung sorgum (%) (Sorghum flour (%))	<i>In range</i>	0	50	3 (+++)
Pati resisten (%) (Resistant starch (%))	<i>Targeted</i>	5	15	5 (+++++)
Daya rehidrasi (%) (Rehydration capacity (%))	<i>Maximize</i>	40.80	62.73	4 (++++)
<i>Hardness</i> (gr)	<i>In range</i>	402.99	520.09	3(+++)

Keterangan: AC= *autoclaving-cooling*

Note: AC= *autoclaving-cooling*

Tabel 9. Verifikasi formula optimum *breakfast meal flakes* (BMF)

Table 9. Formula verification results froms *Breakfast meal flakes* (BMF)

Respons (Response)	Prediksi (Prediction)	Verifikasi (Verification)	95% CI Low	95% CI High	95% PI Low	95% PI High
Pati resisten (%) (Resistant starch (%))	11.46	11.65	10.92	11.99	10.73	12.18
Daya rehidrasi (%) (Rehydration capacity (%))	58.48	55.65	54.11	62.84	52.61	64.34
<i>Hardness</i> (gr)	411.14	415.12	404.47	417.81	402.12	420.17

Keterangan: CI= *confident interval*, PI= *prediction interval*

Note: CI= *confidence interval*, PI= *prediction interval*

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, Faridah, D. N., & Jenie, B. S. L. (2016). Pengaruh retrogradasi dan perlakuan kelembaban panas terhadap kadar pati resisten tipe III Daluga. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 27(1), 78–86. <https://doi.org/10.6066/jtip.2016.27.1.78>
- Aini, N., Dewi, S., Asyifa, S. N., & Sofyan, A. (2021). The utilization of resistant starch in aking rice flour as anti-diabetic food ingredients. *Proceedings of the International Summit on Science Technology and Humanity (ISETH) 2020: Health and Well-Being*, 5, 27–34.
- [AOAC] Association of Official Analytical Chemist. (2012). Official Method of Analytical of the Association of Official Analytical Chemist. Washington DC (US): AOAC International.
- Ariyantoro, A. R., Amanto, B. S., & Kiswuri. (2020). Effect of heat moisture treatment (HMT) on physicochemical characteristics of sorghum flour (*Sorghum bicolor* L. moench). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 518(1), 012067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/518/1/012067>
- Ashwar B. A., Gani, A., Wani, I. A., Shah, A., Masoodi, F. A., & Saxena, D. C. (2016). Production of resistant starch from rice by dual autoclaving-retrogradation treatment: Invitro digestibility, thermal and structural characterization. *Food Hydrocolloids*, 56(19), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.12.004>
- Baby, L., Suman, K. T., Krishnan, S., & Indira, V. (2016). Effect of autoclaving and cooling on resistant starch formation in rice starch. *Journal of Dairying, Foods & Home Sciences*, 35(2), 137–142. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.v35i2.10722>
- Bukhori, J. A., Karim, A., & Hariyadi, P. (2019). Pengaruh teknik pengolahan terhadap karakteristik kimia dan swelling power pada tapioka yang dihasilkan. *Prosiding Seminar Nasional II Hasil Litbangyasa Industri* (hlm. 142–148).
- Chen, X., He, X., Fu, X., & Huang, Q. (2015). In vitro digestion and physicochemical properties of wheat starch/flour modified by heat moisture treatment. *Journal of Cereal Science*, 63, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.03.003>
- Colque, R. J. B., Barreto, F. I. R., Solórzano, J. W. V., Arévalo, A. M., & Ascheri, J. L. R. (2023). Physicochemical properties of extrudate-based flakes from whole banana flour and rice flour blends. *Brazilian Journal of Food Technology*, 26, 1–13. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.02923>
- Daniels, E., Wulandari, N., & Faridah, D. N. (2023). Glycemic index of sweet corn and the characteristics of their flakes by adding the red bean. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 34(2), 233–241. <https://doi.org/10.6066/jtip.2023.34.2.233>
- Dayu, P. V., & Dyna, F. (2019). Standarisasi ganyong (*Canna edulis* ker) sebagai pangan alternatif pasien diabetes mellitus. *Jurnal Katalisator*, 4(2), 111–118. <https://doi.org/10.22216/jk.v4i2.4567>
- Dudu, O. E., Oyedele, A. B., Oyeyinka, S. A., & Ma, Y. (2019). Impact of steam heat moisture treatment on structural and functional properties of cassava flour and starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 1056–1064. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.210>
- Ee, K. Y., Eng, M. K., & Lee, L. M. (2020). Physicochemical, thermal and rheological properties of commercial wheat flours and corresponding starches. *Food Science and Technology*, 40(Suppl. 1), 51–59. <https://doi.org/10.1590/fst.39718>
- Ega, L., & Lopulalan, C. G. C. (2015). Modifikasi pati sagu dengan metode heat moisture treatment. *Agrotekno, Jurnal Teknologi Pertanian*, 4(2), 33–40. <https://doi.org/10.30598/jagrotekno.2015.4.2.33>
- Fang, G., Liu, K., & Gao, Q. (2023). Effects of heat moisture treatment on the digestibility and physicochemical properties of waxy and normal potato starches. *Foods*, 12(1), 68. <https://doi.org/10.3390/foods12010068>
- Faozi, I., Karseno, K., & Handayani, I. (2023). Kombinasi fermentasi bakteri asam laktat dan pemanasan bertekanan-pendinginan dalam pembentukan pati resisten tepung talas beneng (*Xanthosoma undipes* K. Koch). *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 28(2), 255–264. <https://doi.org/10.18343/jipi.28.2.255>
- Faridah, D. N., Damaiyanti, S., Indrasti, D., Jayanegara, A., & Afandi, F. A. (2022a). Effect of heat moisture treatment on resistant starch content among carbohydrate sources: a meta-analysis. *International Journal of Food Science Technology*, 57(4), 1965–1974. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15276>
- Faridah, D. N., Silitonga, R. F., Indrasti, D., Afandi, F. A., Jayanegara, A., & Anugerah, M. P. (2022b). Verification of autoclaving-cooling treatment to increase the resistant starch contents in food starches based on meta-analysis result. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.904700>

- Fonseca, L. M., Halal, S. L. M., Dias, A. R. G., & Zavareze, E. R. (2021). Physical modification of starch by heat-moisture treatment and annealing and their applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 274, 118665. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118665>
- Gallagher, E., McCarthy, D., Gormley, T. R., & Arendt, E. (2004). Improving the quality of gluten-free products. Agriculture and Food Development Authority. Teagasc.
- Goel, C., Semwal, A. D., Khan, A., Kumar, S., & Sharma, G. K. (2020). Physical modification of starch: Changes in glycemic index, starch fractions, physicochemical and functional properties of heatmoisture treated buckwheat starch. *Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 2941–2948. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04326-4>
- Hamidah, N., Legowo, A. M., & Anwar, S. (2019). Kualitas sensori, ukuran pori, indeks glikemik, dan beban glikemik roti tawar substitusi tepung singkong (*Manihot esculenta*) dan tepung tempe. *Media Gizi Indonesia*, 14(2), 154–163. <https://doi.org/10.20473/mgi.v14i2.154-163>
- Herawati, E. R., Ariani, D., Nurhayati, R., Miftakhussolikhah, M., Na'imah, H., & Marsono, Y. (2020). Effect of autoclaving-cooling treatments on chemical characteristic and structure of tacca (*Tacca leontopetaloides*) starch. *Proceedings of the 5th International Conference on Food, Agriculture and Natural Resources (FANRes 2019)* (hlm. 169–172). <https://doi.org/10.2991/aer.k.200325.034>
- Herverly, Garnida, Y., & Nastiti, A. G. (2020). Karakteristik flakes yang dihasilkan dari tepung hanjeli (*Coix lacryma jobi* L.) termodifikasi dengan metode *heat moisture treatment*. *Pasundan Food Technology Journal*, 7(1), 33–37. <https://doi.org/10.23969/pftj.v7i1.2693>
- Irhami, Anwar, C., & Kemalawaty, M. (2019). Karakteristik sifat fisikokimia pati ubi jalar dengan mengkaji jenis varietas dan suhu pengeringan. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 20(1), 33–44. <https://doi.org/10.21776/ub.jtp.2019.020.01.4>
- Kim, N. H., Kim, J. H., Lee, S., Lee, H., Yoon, J. W., Wang, R., & Yoo, S. H. (2010). Combined effect of autoclaving-cooling and crosslinking treatments of normal corn starch on the resistant starch formation and physicochemical properties. *Starch-Stärke*, 62(7), 358–363. <https://doi.org/10.1002/star.200900237>
- Lemmens, E., Deleu, L. J., Brier, N. D., Smolders, E., & Delcour, J. A. (2021). Mineral bio-accessibility and intrinsic saccharides in breakfast flakes manufactured from sprouted wheat. *LWT*, 143, 111079. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111079>
- Li, X., Zhang, X., Yang, W., Guo, L., Huang, L., Li, X., & Gao, W. (2021). Preparation and characterization of native and autoclaving-cooling treated pinellia ternate starch and its impact on gut microbiota. *International Journal of Biological Macromolecules*, 182, 1351–1361. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.077>
- Marta, H., Cahyana, Y., Bintang, S., Soeherman, G. P., & Djali, M. (2022). Physicochemical and pasting properties of corn starch as affected by hydrothermal modification by various methods. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 792–812. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2064490>
- Masyitha, N. F., Mahdiyah, & Efrina, E. (2021). Pengaruh substitusi pangan lokal hanjeli (*Coix lacryma jobi* L.) terhadap daya terima fettuccine sukun. *Jurnal Pendidikan Tata Boga dan Teknologi*, 2(2), 123–128. <https://doi.org/10.24036/jptbt.v2i2.190>
- Muliani, D., Sartono, S., & Yulianto, Y. (2023). Daya terima flakes tepung jagung sebagai makanan selingan tinggi serat. *Jurnal Gizi dan Kesehatan*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.36086/jgk.v3i1.1580>
- Novita, D., Hasbullah, U. H. A., Nurdyansyah, F., & Muflihati, I. (2023). Modifikasi fisik tepung suweg (*Amorphophallus campanulatus*) dengan iradiasi sinar ultraviolet C (UV-C) dan *heat moisture treatment* (HMT). *Agrointek Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 17(1), 182–192. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v17i2.13555>
- Nuriana, A., Aini, N., & Karseno, K. (2019). Formulasi breakfast meal flakes dari tepung suweg dan stabilized rice bran menggunakan metode respon permukaan. *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 8(2), 52–59. <https://doi.org/10.17728/jatp.3952>
- Onyango, C., Mewa, E. A., Mutahi, A. W., & Okoth, M. W. (2013). Effect of heat-moisture-treated cassava starch and amaranth malt on the quality of sorghum-cassava-amaranth bread. *African Journal of Food Science*, 7(5), 80–86. <https://doi.org/10.5897/AJFS2012.0612>
- Parwiyanti, Pratama, F., Wijaya, A., & Malahayati, N. 2016. Profil *pasting* pati ganyong termodifikasi dengan *heat moisture treatment* dan gum xanthan untuk produk roti. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 27(2), 185–192. <https://doi.org/10.6066/jtip.2016.27.2.185>
- Permana, R. A., & Putri, W. D. R. (2015). Pengaruh proporsi jagung dan kacang merah serta substitusi bekatul terhadap karakteristik fisik

- kimia flakes. *Jurnal Pangan dan Agroindustri* 3(2), 734–742.
- Putra, L. O., Suharti, S., Sarwono, K. A., Sutikno, S., Fitri, A., Astuti, W. D., Rohmatussolihat, R., Widyastuti, Y., Ridwan, R., & Fidriyanto, R. (2023). The effects of heat-moisture treatment on resistant starch levels in cassava and on fermentation, methanogenesis, and microbial populations in ruminants. *Veterinary World*, 16(4), 811–819. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2023.811-819>
- Rasyda, R. Z., Muhandri, T., & Budijanto, S. (2020). Profil gelatinisasi dan komponen antioksidan tepung ketan hitam termodifikasi dengan annealing. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 31(2), 164–170. <https://doi.org/10.6066/jtip.2020.31.2.164>
- Setiarto, R. H. B., Widhyastuti, N., & Sumariyadi, D. A. (2018). Peningkatan kadar pati resisten tipe III tepung singkong termodifikasi melalui fermentasi dan pemanasan bertekanan-pendinginan. *Biopropal Industri*, 9(1), 9–23.
- Silitonga, R. F., Faridah, D. N., Indrasti, D., Afandi, F. A., & Jayanegara, A. (2021). Kadar pati resisten pangan tinggi karbohidrat hasil autoclaving-cooling 2 siklus: studi meta-analisis. *Warta IHP/Journal of Agro-based Industry*, 38(1), 79–88. <https://doi.org/10.32765/wartaihp.v38i1.6987>
- Silva, D. J. S., Hashimoto, J. M., Nabeshima, E. H., Salgado, R. T., Freitas, T. K. T., & Silva, K. J. D. (2021). Correlation between the rheological and technological properties of biscuits with different levels of replacement of wheat flour by rice and azuki bean flour. *International Journal of Food Science Technology*, 56(10), 5190–5200. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15312>
- Soeka, S. Y., & Sulistiani. (2017). Profil vitamin, kalsium, asam amino, dan asam lemak tepung jewawut (*Setaria italica* L.) fermentasi. *Jurnal Biologi Indonesia*, 13(1), 85–96. <https://doi.org/10.47349/jbi/13012017/83>
- Subroto, E., Indarto, R., Marta, H., & Shalihah, S. (2019). Effect of heat moisture treatment on functional and pasting properties of potato (*Solanum tuberosum* L. var. Granola) starch. *Food Research*, 3(5), 469–476. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.3\(5\).110](https://doi.org/10.26656/fr.2017.3(5).110)
- Syafutri, M. I., Syaiful, F., Lidasari, E., & Pusvita, D. (2020). Pengaruh lama dan suhu pengeringan terhadap karakteristik fisikokimia tepung beras merah (*Oryza nivara*). *Agrosaintek: Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian*, 4(2), 103–111. <https://doi.org/10.33019/agrosainstek.v4i2.120>
- Tamrin, T., Putri, C., Rahmawati, W., & Kuncoro, S. (2023). Mempelajari pengaruh suhu dan jenis jeroan terhadap mutu tepung jeroan. *Agricultural Biosystem Engineering*, 2(4), 554–563. <https://doi.org/10.23960/jabe.v2i4.8398>
- Wang, M., Sun, M., Zhang, Y., Chen, Y., Wu, Y., & Ouyang, J. (2019). Effect of microwave irradiation-retrogradation treatment on the digestive and physicochemical properties of starches with different crystallinity. *Food Chemistry*, 298, 125015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125015>
- Xiang, G., Li, J., Lin, Q., Zhang, Y., Ding, Y., Guo, X., Pan, Q., Liu, Q., Fu, X., Yang, Y., & Han, W., Fang, Y. (2023). The effect of heat–moisture treatment changed the binding of starch, protein and lipid in rice flour to affect its hierarchical structure and physicochemical properties. *Food Chemistry*: X, 19, 100785. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100785>
- Yadav, B. S., Sharma, A., & Yadav, R. B. (2009). Studies on effect of multiple heating/cooling cycles on the resistant starch formation in cereals, legumes and tubers. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(Suppl. 4), 258–272. <https://doi.org/10.1080/09637480902970975>
- Yuliwardi, F., Syamsir, E., Hariyadi, P., & Widowati, S. (2014). Effects of two-cycle autoclaving-cooling on resistant starch content of rice flour and the resulted rice noodle. *Jurnal Pangan*, 23(1), 43–51.
- Zhang, C., Du, M., Cao, T., & Xu. W. (2023). The effect of acetylation on the physicochemical properties of chickpea starch. *Foods*, 12(13), 2462. <https://doi.org/10.3390/foods12132462>
- Zheng, M. Z., Xiao, Y., Yang, S., Liu, H. M., Liu, M. H., Yaqoob, S., Xu, X. Y., & Liu, J. S. (2020). Effects of heat–moisture, autoclaving, and microwave treatments on physicochemical properties of proso millet starch. *Food Science & Nutrition*, 8(2), 735–743. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1295>