



Terbit online pada laman: <https://ejurnal.umri.ac.id/index.php/JST>

Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Literature Review

Teknologi Modifikasi Fisik Heat Moisture Treatment (HMT) pada Tepung Beras dan Tepung Sorgum: Kajian Sistematis Parameter Proses, Transformasi Struktur Granula Pati dan Prospek Skalabilitas Industri

Ririn Puji Hastuti^{*}, Ariya Eka Alel, Cory Dian Alfarisi, Lisa Legawati, Yelmida Aziz

Universitas Riau, Kampus Bina Widya KM. 12,5, Simpang Baru, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau, 28293, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 15 Mei 2026
Diterima : 5 Juni 2026
Diterbitkan : 12 Juni 2026

KATA KUNCI

Heat Moisture Treatment, Granula pati, Tepung beras, Tepung sorgum.

KORESPONDENSI

*E-mail: ririn.puji@lecturer.unri.ac.id

A B S T R A K

Heat Moisture Treatment (HMT) merupakan teknik modifikasi fisik pati tanpa residu kimia yang mendukung prinsip clean-label dalam industri pangan. Teknologi ini menjadi solusi strategis dalam upaya diversifikasi pangan untuk mengurangi ketergantungan industri nasional terhadap impor gandum yang mencapai USD 2,2 miliar pada tahun 2022. Kajian sistematis terhadap 45 publikasi ilmiah terpilih, dari total 65 literatur yang lolos penyaringan awal, meninjau dampak HMT terhadap karakteristik tepung beras dan sorgum. Hasil sintesis data menunjukkan bahwa HMT meningkatkan suhu gelatinisasi (T_g naik 3 - 8°C), menurunkan peak viscosity (15 - 30%), serta meningkatkan kadar pati resisten dari 3 - 5% menjadi 8 - 15%. Pada tepung sorgum, interaksi pati dengan protein kafirin dan komponen non-pati lainnya terbukti memodifikasi respons HMT secara signifikan dibandingkan dengan pati murni. Penelitian ini mengidentifikasi kebutuhan mendesak akan data parameter HMT yang spesifik untuk varietas lokal Indonesia serta perlunya analisis techno-economic yang komprehensif untuk mendukung keberhasilan skalabilitas industri pangan nasional di masa depan.

A B S T R A C T

Heat Moisture Treatment (HMT) is a clean-label, residue-free physical starch modification technique that serves as a strategic solution for food diversification, aiming to reduce national reliance on imported wheat, which reached USD 2.2 billion in 2022. This systematic review of 45 selected scientific publications, out of 65 initially screened articles, evaluates the impact of HMT on rice and sorghum flour characteristics. Synthesized results indicate that HMT consistently increases gelatinization temperature (T_g up by 3 - 8°C), reduces peak viscosity (15 - 30%), and boosts resistant starch content from 3 - 5% to 8 - 15%. In sorghum flour, the interaction between starch and non-starch components, particularly kafirin proteins, significantly modifies the HMT response compared to pure sorghum starch. This study highlights critical research gaps, specifically regarding the need for optimal HMT parameters tailored to Indonesian local varieties and the necessity of comprehensive techno-economic analysis to facilitate industrial-scale implementation.

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan industri pangan Indonesia terhadap tepung terigu impor merupakan tantangan struktural yang semakin mendesak untuk diatasi. Nilai impor gandum dan produk turunannya tercatat mencapai USD 2,2 miliar pada tahun 2022, menjadikan gandum salah satu komoditas impor terbesar Indonesia [5]. Produksi tepung terigu nasional mencapai 8,2 juta ton pada tahun 2023 [6] seluruhnya bertumpu pada gandum impor sehingga menciptakan kerentanan ganda terhadap fluktuasi harga komoditas global dan instabilitas rantai pasok internasional. Dalam kerangka diversifikasi pangan nasional, dua komoditas lokal menempati posisi strategis sebagai kandidat substitusi terigu yang saling komplementer. Pertama, tepung beras berbasis broken rice dan surplus pascapanen, dengan total produksi padi nasional mencapai 31,1 juta ton GKG pada 2023. Kedua, tepung sorgum yang bertumpu pada potensi pengembangan *Sorghum bicolor* L. Moench di lahan kering marginal Indonesia seluas lebih dari 18 juta hektare dengan produktivitas rata-rata 3 - 5 ton/ha [7].

Dalam bentuk natifnya, baik tepung beras maupun tepung sorgum menghadapi keterbatasan teknofungsional yang menghambat adopsi industri skala besar. Tepung beras natif menghasilkan pasta yang mudah mengalami retrogradasi dan sineresis selama penyimpanan, dengan stabilitas rendah terhadap pemanasan dan gaya geser mekanis. Tepung sorgum menghadapi kompleksitas lebih tinggi: selain masalah stabilitas pasta serupa, kehadiran antinutrisi berupa tanin terkondensasi (hingga 6% pada high-tannin varieties) dan asam fitat (1 - 3%) secara nyata menurunkan palatabilitas dan bioavailabilitas mineral [28].

Heat Moisture Treatment (HMT) merupakan metode modifikasi fisik pati yang dilakukan dengan pemanasan tepung atau pati pada kadar air terbatas (10 - 35% w/w) pada suhu 80 - 130°C selama 0,25 - 16 jam, tanpa penambahan reagen kimia apapun. Tidak seperti modifikasi kimia-asetilasi, cross-linking yang menghasilkan residu dan memerlukan kode aditif INS pada label produk sesuai standar yang berlaku [26], HMT menghasilkan produk yang dapat dikategorikan sebagai "pati yang diproses secara

fisik" dan memenuhi prinsip *clean-label* [21]. Berbagai kajian telah mendokumentasikan efek HMT pada pati sereal: peningkatan suhu gelatinisasi (T_0 ; naik 3 - 8°C), penurunan *peak viscosity* (15 - 30%), peningkatan kristalinitas relatif, serta pembentukan kompleks V-amilosa-lipid pada pati beramilosa tinggi [3][15][30].

Meskipun studi HMT pada pati beras dan sorgum telah dilakukan secara terpisah, terdapat tiga kesenjangan penelitian yang belum terjawab secara komprehensif yaitu kajian yang secara khusus membandingkan respons HMT pada tepung utuh dari kedua komoditas dalam satu kerangka analisis masih sangat terbatas, sedangkan komponen non-pati dalam tepung utuh memodifikasi respons HMT secara signifikan dibandingkan pati murni. Kemudian, data parameter HMT optimal berbasis varietas lokal Indonesia (beras Inpari, Ciherang; sorgum Numbu, Kawali) hampir tidak tersedia dalam literatur. Terakhir yaitu kajian tentang prospek skalabilitas dan aspek techno-economic implementasi HMT di fasilitas pengolahan tepung Indonesia belum pernah disajikan secara sistematis.

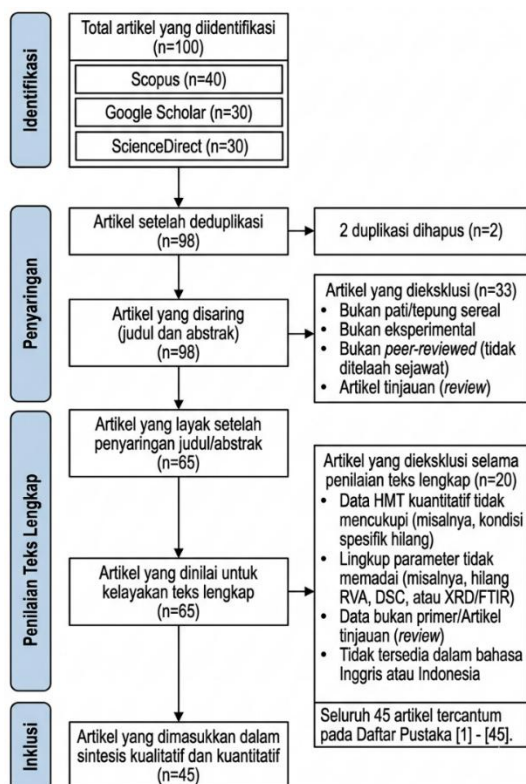
Berdasarkan identifikasi kesenjangan tersebut, artikel review ini bertujuan untuk: (1) menyajikan kajian sistematis mekanisme transformasi struktural granula pati akibat HMT berdasarkan sintesis publikasi ilmiah (2016 - 2024); (2) menganalisis secara komparatif pengaruh parameter proses HMT-*moisture content* (10 - 35%), suhu (80 - 130°C), dan durasi (0,25 - 16 jam), terhadap karakteristik fisikokimia tepung beras dan sorgum; (3) mendiskusikan prospek implementasi HMT pada skala industri pangan nasional.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menerapkan metode *Systematic Literature Review* (SLR) yang berpedoman pada kerangka PRISMA 2020 untuk memastikan objektivitas dan replikabilitas data. Penelusuran literatur dilakukan pada basis data Scopus, Google Scholar, dan ScienceDirect untuk rentang waktu 2016-2024, menggunakan kombinasi kata kunci spesifik dengan operator Boolean: ("*Heat Moisture Treatment*" OR "HMT") AND ("*rice flour*" OR "*rice starch*" OR "*sorghum flour*" OR "*sorghum starch*") AND ("*physicochemical properties*" OR "*gelatinization*" OR "*resistant starch*"). Literatur berbahasa Indonesia,

penelusuran dilakukan menggunakan padanan: ("modifikasi fisik pati" OR "perlakuan panas uap") AND ("tepung beras" OR "tepung sorgum").

Kriteria inklusi yang diterapkan meliputi: (1) artikel jurnal peer-reviewed yang melaporkan data eksperimental kuantitatif mengenai HMT pada pati atau tepung sereal; (2) publikasi dalam bahasa Inggris atau Indonesia; (3) parameter yang dilaporkan mencakup minimal satu dari: profil pasting (RVA), sifat termal (DSC), atau kristalinitas (XRD/FTIR); dan (4) bahan yang dikaji adalah pati atau tepung beras maupun sorgum, termasuk referensi komparatif dari sereal relevan seperti jagung atau barley. Kriteria eksklusi meliputi: artikel review tanpa data primer, prosiding konferensi yang tidak melalui proses review sejawat, laporan teknis lembaga non-akademik, serta publikasi yang tidak mencantumkan parameter proses HMT secara eksplisit.



Gambar 1. Alur seleksi artikel berdasarkan protokol PRISMA 2020 beserta alasan eksklusi pada tahap penilaian teks lengkap

Proses seleksi dilaksanakan secara bertahap sesuai alur PRISMA 2020. Pencarian awal pada ketiga basis data menghasilkan total 100 jurnal potensial. Setelah proses eliminasi, tersisa 98 artikel unik yang kemudian diperiksa kesesuaian berdasarkan judul dan abstrak. Hasil skrining awal, sebanyak 33 artikel tereliminasi karena tidak relevan dengan topik. Tahap ini menyisakan 65 artikel yang

dinyatakan lolos evaluasi lanjutan. Pada proses pembacaan teks lengkap dari 65 jurnal, ditemukan 20 artikel yang tidak memenuhi kriteria inklusi lebih spesifik. Melalui penyaringan mendalam tersebut diperoleh 45 artikel final yang valid untuk digunakan dalam korpus dan dilanjutkan ke tahap sintesis tematik. Seluruh literatur yang dianalisis tercantum dalam Daftar Pustaka nomor [1] sampai [45]. Alur penelusuran, penyaringan, hingga alasan pembatalan artikel dalam tinjauan sistematis ini digambarkan secara terperinci pada diagram alir PRISMA 2020 di Gambar 1.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Prinsip Dasar dan Mekanisme Heat Moisture Treatment

3.1.1 Posisi HMT dalam Spektrum Modifikasi Pati

Heat Moisture Treatment pertama kali dikembangkan secara sistematis pada tahun 1970-an sebagai alternatif modifikasi fisik terhadap pati, kemudian dirujuk secara komprehensif [3]. Secara mekanistik, HMT didefinisikan sebagai perlakuan panas pada pati atau tepung dengan kadar air terbatas (10 - 35% w/w) pada suhu antara 80 - 130°C selama 0,25 hingga 16 jam, dilakukan pada sistem tertutup untuk mencegah kehilangan uap air. Dalam spektrum modifikasi pati, HMT menempati posisi strategis di antara tiga pendekatan utama: modifikasi kimia, modifikasi enzimatik, dan modifikasi fisik. Berbeda dari *annealing* yang menggunakan kelebihan air (>60% w/w) pada suhu di bawah gelatinisasi (50–65°C), HMT menggunakan kadar air terbatas namun suhu yang lebih tinggi, menghasilkan reorganisasi struktural yang lebih dalam dan permanen. Sementara ekstrusi bekerja dengan gelatinisasi penuh dan gaya geser mekanis, HMT mempertahankan integritas granul inilah yang memungkinkan produknya diklasifikasikan sebagai pati alami yang diproses secara fisik sesuai peraturan yang berlaku [26].

3.1.2 Mekanisme Molekuler HMT

Mekanisme HMT berlangsung melalui tiga tahapan terintegrasi. Tahap inisiasi (50 - 80°C), energi termal mendorong molekul air berpenetrasi ke dalam granul melalui permukaan pori dan daerah amorf. Air berperan sebagai *plasticizer* yang menurunkan suhu transisi gelas (T_g) pati, mengaktifkan mobilitas rantai polimer. Tahap reorganisasi (80 - 130°C), rantai amilosa dan rantai panjang amilopektin dalam domain amorf memperoleh energi kinetik untuk membentuk ulang konformasi heliks ganda

(*double helix*). Perubahan struktural HMT dimulai dari domain amorf sebelum memengaruhi domain kristalin [2]. Temuan kritis ini menjelaskan alasan HMT dapat meningkatkan keteraturan jarak pendek tanpa mengubah pola kristalin tipe A secara drastis. Melalui *small-angle X-ray scattering* (SAXS) dapat diketahui HMT menyebabkan pemanjangan *double helix* dari ketebalan lapisan kristal 14,61 nm pada pati *native* menjadi 14,83 - 17,30 nm pada kondisi MC 20 - 26% [30]. Tahap selanjutnya yaitu stabilisasi, terjadi ketika ikatan hidrogen yang baru terbentuk mengonsolidasikan struktur yang lebih teratur, termasuk pembentukan kompleks inklusi V-amilosa-lipid pada tepung beras beramilosa tinggi (>15%).

3.1.3 Tiga Parameter Kritis Proses HMT

Efek HMT ditentukan secara interaktif oleh tiga parameter proses: *Moisture Content* (MC), suhu, dan durasi. *Moisture Content* (10 - 35% w/w) mengontrol seberapa jauh air menjadi mediator reorganisasi rantai. Penelitian pada pati *barley* yang telah dilakukan dapat diperoleh hasil bahwa peningkatan MC dari 15% ke 25% pada suhu 90°C meningkatkan kristalinitas relatif dari 28,52% menjadi 41,32%, sementara MC 35% justru menurunkan kristalinitas akibat gelatinisasi parsial [19]. Suhu (80 - 130°C) menentukan energi termal untuk reorganisasi rantai; Kenaikan suhu HMT dari 110°C ke 130°C menghasilkan peningkatan suhu gelatinisasi yang lebih besar, dengan efek

lebih dramatis pada pati beramilosa tinggi [31]. Durasi (0,25 - 16 jam) menentukan seberapa jauh reorganisasi berlangsung hingga ekuilibrium termal sehingga diperoleh kondisi optimal HMT pada 110°C, 25% MC, selama 4 jam melalui optimasi RSM (*Response Surface Methodology*) [34].

Tabel 1.

Perbandingan Perubahan Morfologi Granula (SEM) Tepung dan Pati Beras Akibat HMT dari Berbagai Studi [37], [41], [42], [43], [44].

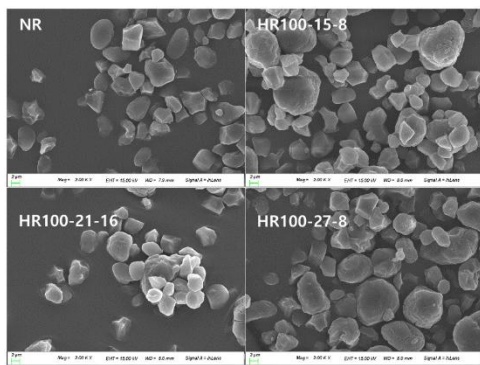
Sampel	Kondisi HMT	Morfologi Granula Natif	Perubahan Morfologi Pasca-HMT	Interpretasi Mekanistik
Tepung Beras (RF)	KA 30%, 110°C, 2 jam	Granula komposit aglomerat, permukaan kasar, tidak beraturan	Granula teraglomerasi dan menempel; permukaan semakin kasar dan berlekah	Gelatinisasi parsial; denaturasi protein permukaan memperkuat ikatan antar-granula; pembentukan kompleks pati-lipid

Sampel	Kondisi HMT	Morfologi Granula Natif	Perubahan Morfologi Pasca-HMT	Interpretasi Mekanistik
Pati Beras Natif (NRS)	Tidak ada perlakuan	Granula polihedral kecil, permukaan halus, 2-8 µm	-	Struktur referensi; menunjukkan perbedaan jelas antara pati murni dan tepung
Pati Beras Amilosa Tinggi (Goami)	100°C, KA 24,2%, 11,5 jam	Granula polihedral, beberapa berbentuk semisferis	Permukaan lebih irregular; aglomerasi meningkat; beberapa granula retak di bagian tepi	Kehilangan integritas fisik akibat gelatinisasi parsial; rearrangemen rantai amilosa-amilopektin
Pati Beras Hitam (AP) & Merah (AV)	110°C, KA 20%, 3 jam	Oval terpotong, hemisferis; diameter 1,55 - 6,28 µm	Agglomerasi besar (57,63–588,23 µm untuk AP-HMT); granula sebagian tergelatinisasi; permukaan berlekah	Kandungan amilosa tinggi pada beras hitam memperkuat aglomerasi; pembentukan kompleks amilosa-lipid tipe Vh

3.2 Transformasi Struktur Granula Pati Pasca-HMT

3.2.1 Morfologi Granul (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) secara konsisten menunjukkan bahwa HMT menginduksi perubahan morfologi granul yang khas. Pada pati beras *native*, granul memiliki permukaan yang relatif licin berbentuk poligonal atau heksagonal berukuran 2 - 10 µm. Pasca-HMT, tiga perubahan utama yang teridentifikasi: (1) permukaan menjadi lebih kasar (*roughening*) akibat gelatinisasi parsial dan deposisi ulang material pati dari domain amorf; (2) terjadi pengelompokan (*aggregation*) antargranul melalui jembatan material pati yang melunak; dan (3) pada MC tinggi (>30%), beberapa granul menunjukkan *crack* permukaan dan deformasi parsial [36][18]. Tepung beras ketan dengan variasi MC 12–36% menunjukkan ukuran partikel rata-rata bergeser dari 89,5 µm pada kontrol ke rentang 89,5–124 µm, dengan distribusi ukuran partikel yang semakin lebar seiring peningkatan MC konsisten dengan meningkatnya derajat agregasi antar granul [8].

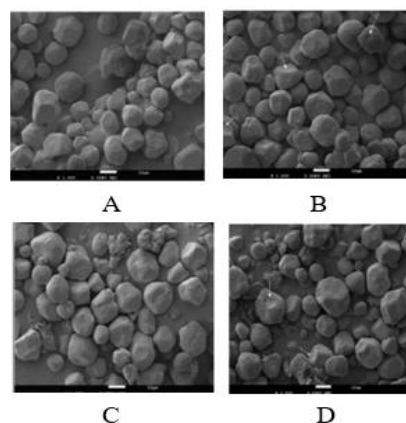


Gambar 2. Hasil Uji SEM pada Pati alami atau (*Native Starch*) dan pati beras HMT pada suhu 100°C, kadar air 15, 21 dan 27 % [41]

Tepung dan pati sorgum tanpa modifikasi HMT memiliki penampang lebih halus dan bentuk lebih teratur. Sedangkan pada perlakuan HMT terjadi perubahan granula pati. Modifikasi *Heat-Moisture Treatment* (HMT) pada pati sorgum mempengaruhi struktur granula melalui pembentukan lubang pada permukaan akibat adanya pembengkakan parsial dan kerusakan jaringan pusat. Proses HMT secara simultan memicu reorganisasi molekuler yang dapat menghasilkan granula pati dengan struktur lebih kompak [45].

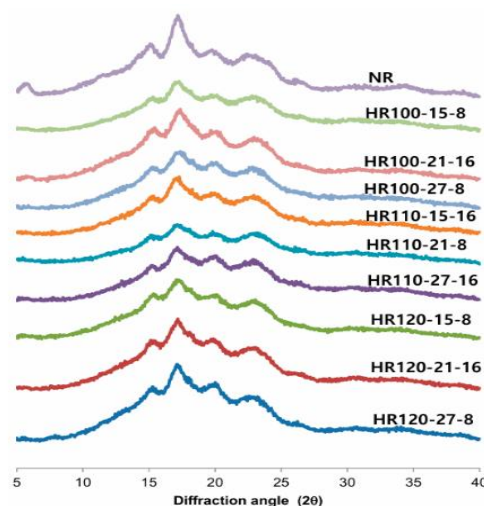
3.2.2 Struktur Kristalin (XRD)

Analisis *X-ray Diffraction* (XRD) mengungkapkan bahwa HMT pada pati serelia umumnya tidak mengubah pola kristalin dasar tipe A (puncak difraksi pada $2\theta \approx 8^\circ, 11^\circ, 15^\circ, 17^\circ, 18^\circ, 20^\circ,$ dan 23°). Temuan kritis adalah munculnya puncak difraksi tipe V pada $2\theta \approx 13^\circ$ dan 20° pada pati beras beramilosa tinggi setelah HMT. Kompleks V-amilosa-lipid muncul jelas pada pati beras Chiang (amilosa 20,2%) saat HMT 100°C, 16 jam, 27% MC, sementara varietas *glutinous* (1,4% amilosa) dan Jasmine (15% amilosa) tidak menunjukkan puncak ini pada kondisi identik, hal ini menegaskan ambang batas amilosa sekitar 15–20% untuk pembentukan kompleks V yang signifikan [15]. Berdasarkan perspektif kristalinitas relatif, terjadi peningkatan dari 23,08% menjadi 42,92% setelah HMT pada 110°C, 36% MC pada pati beras ketan [8]. Data XRD memiliki korelasi fungsional dengan berbagai sifat pati. Penurunan RC (*relative cristalinity*) menyebabkan ikatan hidrogen di wilayah amorf dan pembentukan struktur matriks protein-pati-lipid yang lebih rigid setelah proses HMT [37].



Gambar 3. Hasil Uji SEM pada pati sorgum (A), HMT pati sorgum dengan kadar air 20% (B), tepung sorgum (C), dan HMT tepung sorgum dengan kadar air 20% (D) [45]

Berdasarkan Gambar 3 hasil uji XRD dapat diketahui bahwa terjadi perubahan structural pada pati beras akibat perlakuan HMT. Pati beras (NR) secara konsisten menampilkan pola tipe-B yang ditandai dengan puncak tajam pada sudut $5,3^\circ$ dan $17,2^\circ$. Setelah perlakuan HMT pada berbagai variasi perlakuan, terlihat penurunan intensitas puncak pada sudut 5° , serta terjadi penggabungan puncak pada $22,7^\circ$ dan $24,2^\circ$ menjadi puncak di $23,1^\circ$. Perubahan tersebut tidak mengubah pola difraksi pati beras dengan perlakuan HMT, yaitu tetap pada pola difraksi tipe-B. Penurunan intensitas puncak difraksi mengindikasikan adanya reduksi pada area kristalin pati. Hal ini berhubungan dengan peningkatan kerentanan enzimatis pada pati sehingga lebih mudah dicerna [41]



Gambar 4. Hasil uji XRD pati beras alami (NR) dengan perlakuan HMT dengan perlakuan suhu HMT 100,110 dan 120, persentase kadar air 15, 21 dan 27% serta durasi perlakuan HMT 8 dan 16 jam [41]

Tabel 2.

Ringkasan parameter proses HMT dan perubahan profil pasting pada berbagai tepung/pati

Bahan	MC (%)	Suhu (°C)	Waktu (jam)	Δ Peak Viscosity	Δ To (°C)
T. beras cokelat [33]	20	110	4	Turun 15–25%	+3–6
T. beras putih [18]	25	110	4	Turun 20–30%	+5–8
T. beras merah [27]	20–30	80–120	4	Turun progresif	+3–6
Pati beras ketan [8]	12–36	110	4	Setback naik, peak turun	signifikan
Pati beras (n. amilosa) [17]	15–30	100	16	Turun; lebih stabil	+3–8
Pati sorgum putih [23]	18–27	100	16	Turun; onset naik	signifikan
T. sorgum utuh [25]	20–25	100	16	Turun; gel teratur	Naik
Pati barley (referensi) [19]	25	90	4	3.626→5.147 cP (+42%)	+18

Tabel 3.

Perbandingan kondisi proses dan efek struktural: HMT versus annealing [3, 20, 21]

Parameter	Heat Moisture Treatment (HMT)	Annealing (ANN)
Kadar Air	Terbatas: 10–35% w/w	>60% w/w (kelebihan air)
Suhu	80–130°C (di atas T _g , mendekati T _o)	50–65°C (di bawah T _o gelatinisasi)
Mekanisme Utama	Reorganisasi double helix + penguatan domain kristalin dari domain amorf	Penyempurnaan kristal yang telah ada tanpa membentuk heliks baru
Perubahan Kristalinitas	Meningkat signifikan; kompleks V-amilosa-lipid dapat terbentuk	Meningkat moderat; kristal yang ada menjadi lebih sempurna
Peak Viscosity	Menurun 15–30% (granul lebih rigid)	Cenderung meningkat atau berubah minimal
Setback Viscosity	Menurun (retrogradasi lebih terkontrol)	Setback lebih tinggi (retrogradasi relatif lebih besar)
Morfologi Granul (SEM)	Permukaan kasar, pengelompokan (aggregation) parsial	Permukaan relatif lebih halus, granul lebih terdefinisi

3.2.3 Keteraturan Jarak Pendek (FTIR) dan Sifat Termal (DSC)

Spektroskopi FTIR menyediakan informasi keteraturan jarak pendek yang komplementer terhadap XRD melalui rasio absorbansi 1047 cm⁻¹ (kristal/teratur) terhadap 1022 cm⁻¹ (amorf/tidak teratur). Terjadi

peningkatan rasio (1047/1022 cm⁻¹) yang signifikan pada proses pasca-HMT dibandingkan dengan pati *native* maupun annealing [20]. Pati beras dengan keteraturan jarak pendek awal yang lebih tinggi menunjukkan peningkatan pati resisten yang lebih besar setelah proses HMT, hal ini menunjukkan suatu relasi praktis dalam seleksi varietas beras [35]. *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) mengkuantifikasi perubahan parameter termal secara konsisten: HMT meningkatkan T_o, T_p, dan T_c secara universal. Kenaikan T_o sebesar 3–8°C, dengan efek lebih besar pada pati amilosa tinggi dan MC yang lebih tinggi [17].

3.2.4 Profil Pasting (RVA)

Rapid Visco Analyzer (RVA) merupakan metode standar evaluasi perilaku pati selama pemanasan-pendinginan. Penurunan *Peak Viscosity* yang konsisten (15–30%) menunjukkan peningkatan rigiditas granul, sehingga lebih resisten terhadap *swelling* dan ruptur. Penurunan *breakdown* merupakan indikator peningkatan stabilitas termal pasta-properti yang diinginkan untuk produk yang mengalami pemanasan dan pengadukan intensif. Peningkatan Pasting *Temperature* pasca-HMT menunjukkan peningkatan T_o yang terukur melalui DSC, dan kedua pengukuran saling mengkonfirmasi derajat modifikasi struktural [30].

3.3 HMT pada Tepung Beras: Parameter, Efek, dan Variasi Varietas

3.3.1 Peran Dominan Amilosa dalam Menentukan Respons HMT

Kandungan amilosa merupakan variabel penting dalam memprediksi respons tepung beras terhadap HMT. Amilosa—polimer linier glukosa dengan ikatan α -(1→4) dan derajat polimerisasi 500–2.000 unit, adalah komponen yang sangat aktif dalam membentuk kompleks inklusi dengan lipid dan memperkuat domain kristalin. Perbedaan respons ini terdokumentasi dalam studi komparatif menggunakan tiga varietas beras: *Glutinous* (1,4%), *Jasmine* (15%), dan *Chiang* (20,2%) [15]. Kondisi HMT 100°C, 16 jam, kompleks V-amilosa-lipid muncul jelas pada *Chiang* (MC 27%) tetapi tidak pada *Glutinous* dan *Jasmine*, menegaskan ambang batas amilosa ~15–20% untuk respons fundamental HMT. Tepung beras dengan kandungan amilosa tinggi menghasilkan *pasting temperature* lebih tinggi dan indeks glikemik yang lebih

rendah [16]. Pola serupa terjadi pada pati kacang polong berkerut (74–76% amilosa) dibandingkan pati bulat (35–36% amilosa) [31].

3.3.2 Peningkatan Pati Resisten dan Implikasi Indeks Glikemik

Peningkatan kandungan pati resisten (RS) merupakan hasil dari proses HMT pada tepung beras. RS tidak terhidrolisis oleh enzim amilase di dalam usus halus, berfungsi seperti serat pangan, menghasilkan *Short-Chain Fatty Acids* (SCFA) melalui fermentasi di usus besar, dan berkaitan dengan regulasi glikemik yang lebih baik [9]. Rata-rata RS meningkat dari 3–5% pada tepung *native* menjadi 8–15% melalui HMT optimal. Proses HMT pada 120°C, 2 jam, MC 80–90% lebih lanjut meningkatkan RS pada beras rekayasa genetika berkadar RS tinggi [22]. Kombinasi proses HMT dan ekstrusi menurunkan *estimated glycemic index* (eGI) secara signifikan dengan pembentukan kompleks pati-lipid tipe A+V sebagai mekanisme utama [33].

3.3.3 Interaksi HMT dengan Komponen Non-Pati dan Sifat Fungsional

Perbandingan respons HMT antara tepung beras utuh dan pati beras murni menggunakan *Confocal Laser Scanning Microscopy* (CLSM) dan XRD. Pada tepung utuh, protein yang melekat pada permukaan granula berpartisipasi dalam pembentukan ikatan hidrogen tambahan dengan rantai amilosa, menciptakan matriks protein-pati yang lebih kompak. HMT secara konsisten menurunkan Swelling Power dan Water Solubility Index tepung beras akibat penguatan interaksi intergranular [18]. Penurunan *swelling power* yang signifikan pada tepung beras merah lokal Indonesia pasca-HMT dan mengidentifikasi kondisi optimal HMT pada suhu 110°C dengan MC 25%, merupakan kontribusi literatur nasional yang relevan untuk varietas lokal [27].

3.4 HMT pada Tepung Sorgum: Kompleksitas Komponen Non-Pati

3.4.1 Karakteristik Unik Pati Sorgum dan Implikasinya terhadap HMT

Sorgum (*Sorghum bicolor* L. Moench) memiliki tiga komponen non-pati yang secara aktif memodifikasi respons HMT: (1) protein kafirin—prolamin spesifik sorgum paling hidrofobik di antara prolamin sereal, membentuk kafirin bodies yang menyelubungi granula pati; (2) tanin terkondensasi (*proanthocyanidin*)—terutama pada varietas

berwarna gelap, kadar 0–3% hingga 6% pada *high-tannin* varieties; dan (3) asam fitat (1–3%) yang membentuk kompleks dengan mineral dan protein. Profil nutrisi sorgum: protein 9–13%, serat ~6%, tanin hingga 6%, menjadikan interaksi komponen non-pati dengan pati selama HMT jauh lebih kompleks dari tepung beras [28].

3.4.2 Perbedaan Fundamental: Pati Murni dan Tepung Utuh

Terdapat perbedaan fundamental antara respons HMT pada pati sorgum murni versus tepung sorgum utuh. Pada pati sorgum murni, HMT menghasilkan penurunan *swelling power* dan solubilitas yang dapat diprediksi, konsisten dengan mekanisme universal HMT. Namun pada tepung sorgum utuh, kafirin yang menyelubungi granula bertindak sebagai barrier fisik terhadap penetrasi air, sehingga efisiensi reorganisasi rantai pati berkurang; gel pasca-HMT lebih teratur dan kompak tetapi dengan viskositas berbeda dari prediksi berbasis pati murni; dan respons termal menunjukkan puncak gelatinisasi yang lebih lebar, mengindikasikan heterogenitas derajat modifikasi pada level granula [25]. Implikasi praktisnya kritis: data parameter HMT yang ditetapkan pada pati sorgum murni tidak dapat diaplikasikan langsung pada tepung sorgum utuh.

3.4.3 Dampak HMT terhadap Anti-Nutrisi dan Peningkatan Pati Resisten

Perbandingan tiga perlakuan yaitu *Dry Heat Treatment*, HMT, dan germinasi pada tepung sorgum varietas SL-46 diperoleh hasil yaitu proses HMT menghasilkan kandungan lemak terendah dan kandungan fenolik tertinggi di antara ketiga perlakuan. Kadar tanin dan fitat menurun pada semua perlakuan, tetapi HMT memberikan pengurangan yang lebih selektif terhadap protein-bound tannin [13]. Proses HMT dengan kelembapan tinggi mengubah profil fenolik secara kompleks pada sorgum *high-tannin*, dengan dampak positif pada bioaktivitas antioksidan dan penurunan digestibilitas pati [24]. Strategi efektif untuk meningkatkan RS tepung sorgum yaitu melalui kombinasi HMT dengan siklus *autoclaving*-pendinginan berulang yaitu melalui 3 siklus. Terjadi peningkatan RS (3% menjadi > 8%), lebih tinggi jika dibandingkan dengan HMT tunggal, melalui sinergi peningkatan keteraturan *double helix* dan retrogradasi terkontrol [12].

3.5 Analisis Komparatif: Tepung Beras versus Tepung Sorgum Termodifikasi HMT

Analisis komparatif lintas literatur mengungkap bahwa kadar amilosa awal merupakan prediktor efektivitas HMT yang berlaku lintas komoditas. Kandungan amilosa sorgum (20–28%) cenderung lebih seragam dibandingkan beras yang bervariasi dari 1,4% hingga lebih dari 25%. Keseragaman amilosa sorgum ini berimplikasi pada prediktabilitas respons HMT yang lebih baik, tetapi dampak kafirin body sebagai variabel pengacau menjadikan sorgum secara keseluruhan lebih kompleks dalam optimasi HMT. Durasi HMT yang lebih panjang (8–16 jam) umumnya diperlukan pada tepung sorgum dibandingkan tepung beras (4 jam) untuk mencapai derajat modifikasi yang sebanding, yang secara langsung berimplikasi pada efisiensi energi proses industri.

3.6 Prospek Skalabilitas Industri Pangan

3.6.1 Konteks Industri Pangan Indonesia

Konteks industri pangan nasional memberikan motivasi kuat bagi pengembangan tepung lokal termodifikasi. Impor gandum Indonesia mencapai USD 2,2 miliar pada 2022 [5], sementara Kementerian Perindustrian [14] mencatat industri produk bakeri, pasta, dan mi di Indonesia sebagai salah satu segmen industri pangan dengan pertumbuhan terdepan selama periode 2018–2023. Dalam segmen *gluten-free* yang tumbuh pesat secara global, terdapat peluang ekspor yang signifikan bagi produk tepung termodifikasi HMT dari Indonesia. Nilai impor gandum yang mencapai USD 2,2 miliar menciptakan urgensi substitusi berbasis tepung lokal termodifikasi yang tidak hanya relevan dari aspek ketahanan pangan, tetapi juga dari aspek efisiensi devisa negara.

3.6.2 Teknologi Peralatan dan Tantangan *Scale-Up*

Implementasi HMT skala industri dapat menggunakan beberapa platform teknologi. *Dryer rotary* merupakan pilihan paling umum dengan ketersediaan di fasilitas pengolahan tepung yang ada, berkapasitas mulai dari 500 kg/*batch* pada skala pilot hingga lebih dari 5 ton/*batch* pada skala industri. *Autoclave* dengan uap bertekanan memungkinkan kontrol MC yang lebih presisi dan distribusi panas lebih seragam, namun kapasitas terbatas dan investasi lebih tinggi. Keberhasilan transfer teknologi HMT tepung sorgum pada skala produksi 1 ton/hari yang diaplikasikan dalam formulasi mi (50% substitusi terigu), *cake* (100% sorgum), dan *cookies* (100% sorgum)—referensi nasional

yang langka dan berharga [32]. Tiga tantangan teknis utama dalam *scale-up* HMT ke skala industri meliputi: keseragaman distribusi panas-uap (*thermal uniformity*) pada batch besar yang dapat menimbulkan gradien suhu 15–20°C, kontrol *moisture content* yang presisi pada skala massal, serta efek skala (*scale-up effect*) yang menyebabkan kondisi optimal laboratorium tidak langsung dapat ditransfer ke skala pilot.

Tabel 4.

Perbandingan komprehensif karakteristik tepung beras dan tepung sorgum pasca-HMT

Karakteristik	Tepung Beras HMT	Tepung Sorgum HMT
Parameter Optimal Umum	MC: 20–25%, Suhu: 100–110°C, Durasi: 4 jam	MC: 20–25%, Suhu: 100–110°C, Durasi: 8–16 jam
Tipe Pati Dasar	Tipe A (stabil)	Tipe A (stabil); kafirin body mempengaruhi respons
Kandungan Amilosa	1,4–25% (sangat bervariasi antarvarietas)	20–28% (lebih seragam antargenotipe)
Δ Peak Viscosity	Turun 15–30%	Turun 10–25% (lebih moderat akibat protein kafirin)
Δ Suhu Gelatinisasi (To)	Naik 3–8°C	Naik 3–6°C
Δ Kristalinitas Relatif	Naik signifikan; kompleks V pada amilosa >15%	Naik moderat; dipengaruhi barrier kafirin
Δ Pati Resisten (RS)	Meningkat dari 3–5% menjadi 8–15%	Meningkat dari 3–5% menjadi >8% (dengan siklus)
Dampak HMT pada Anti-Nutrisi	Data minimal (beras sedikit mengandung anti-nutrisi)	Tanin dan fitat menurun; profil fenolik berubah kompleks
Tantangan Utama HMT	Variasi antarvarietas; dampak pada pigmen beras berwarna	Interaksi kafirin-pati; data tepung utuh vs. pati murni berbeda signifikan
Aplikasi Potensial Industri	Mi bahun/sohun, produk <i>gluten-free</i> , stabilizer pangan, beras rendah GI	Mi sorgum (50% substitusi), <i>cookies & cake gluten-free</i> (hingga 100%)

3.6.3 Aspek Regulasi dan Pelabelan *Clean-Label*

Tepung beras dan sorgum yang dimodifikasi melalui HMT di Indonesia secara prinsip dapat dikategorikan sebagai pangan olahan yang diproses secara fisik dan tidak memerlukan kode aditif pangan seperti yang dipersyaratkan untuk pati termodifikasi kimia. Peraturan BPOM Nomor 33 Tahun 2020 [26] mengelompokkan pati termodifikasi secara fisik termasuk HMT sebagai bahan baku pangan yang diperbolehkan tanpa batas maksimum penggunaan, selama tidak ada penambahan bahan kimia dalam

prosesnya. Pelabelan tepung beras termodifikasi fisik atau tepung sorgum termodifikasi tanpa kode INS/E-number berpotensi meningkatkan penerimaan konsumen yang semakin sadar *clean-label* [21].

4. SIMPULAN

Kajian sistematis ini mengonfirmasi bahwa *Heat Moisture Treatment* (HMT) merupakan teknologi modifikasi fisik yang secara konsisten menghasilkan perubahan struktural-fungsional yang signifikan dan dapat diprediksi pada tepung beras dan tepung sorgum. Berdasarkan perspektif mekanistik, HMT bekerja melalui reorganisasi *double helix* rantai pati yang dimediasi air terbatas, menghasilkan peningkatan suhu gelatinisasi (To naik 3–8°C), penurunan *peak viscosity* (15–30%), peningkatan kristalinitas relatif, dan pada beras beramilosa >15% terjadi pembentukan kompleks V-amilosa-lipid. Kadar amilosa awal merupakan prediktor efektivitas HMT yang paling determinan dan berlaku lintas komoditas serelia.

Berdasarkan perspektif komparatif beras-sorgum, kedua komoditas menunjukkan tren respons HMT yang serupa namun berbeda dalam derajat dan mekanisme. Tepung sorgum memiliki respons lebih kompleks dan tidak sepenuhnya dapat diprediksi dari data pati sorgum murni, akibat peran dominan protein kafirin sebagai barrier penetrasi air dan interaksi tanin dengan matriks pati. Perlakuan HMT selama 8–16 jam umumnya diperlukan untuk tepung sorgum dibandingkan 4 jam untuk tepung beras guna mencapai derajat modifikasi yang sebanding—implikasi langsung terhadap efisiensi energi proses industri.

Berdasarkan perspektif industrialisasi, bukti skala pilot menunjukkan feasibilitas teknis HMT pada skala industri menengah di Indonesia. Peraturan BPOM No. 33/2020 mendukung kategorisasi tepung termodifikasi HMT sebagai produk *clean-label*. Namun, belum tersedianya *data techno-economic analysis* yang komprehensif dan data parameter HMT berbasis varietas lokal Indonesia tetap menjadi hambatan utama adopsi industri yang lebih luas. Pengembangan database HMT berbasis komoditas lokal dan studi kelayakan ekonomi yang transparan merupakan

dua agenda riset yang kritical dan mendesak untuk mengakselerasi kontribusi ilmu pati modifikasi fisik terhadap ketahanan pangan nasional Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Ahmad et al., "Karakteristik Pati Kimpul dengan Modifikasi HMT," *Scientific Timeline*, vol. 1, no. 2, 2021.
- [2] P. Ambigaipalan, R. Hoover, E. Donner, and Q. Liu, "Starch chain interactions within amorphous and crystalline domains during heat-moisture treatment," *Food Chemistry*, vol. 143, pp. 175-184, 2014.
- [3] R. Hoover, "Heat-Moisture Treatment of Starch," in *Advances in Starch Technology*, Springer, 2010.
- [4] R. Hoover et al., "Impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches," Springer, 2023.
- [5] BPS, "Statistik Impor Indonesia: Gandum dan Turunannya," BPS RI, Jakarta, 2023.
- [6] BPS, "Produksi Padi Indonesia 2023," BPS RI, Jakarta, 2024.
- [7] Balitsereal, "Potensi Pengembangan Sorgum di Lahan Marginal Indonesia," Kementerian Pertanian RI, 2022.
- [8] Z. Chen, X. Zhang, F. Zhu, W. Zheng, and Y. Zhou, "Effects of Stir-Frying and Heat-Moisture Treatment on the Physicochemical Quality of Glutinous Rice Flour," *Foods*, vol. 11, no. 13, 2022.
- [9] A. Bojarczuk, S. Skapska, A. M. Khaneghah, and K. Marszalek, "Health benefits of resistant starch: A review," *J. Funct. Foods*, vol. 93, art. 105094, 2022.
- [10] A. P. Bonto, R. N. Tiozon, N. Sreenivasulu, and D. H. Camacho, "Green modification techniques for rice starch and flour," *PMC*, 2020.
- [11] J. L. Enrile et al., "Physical Modification of Starch in Plant-Based Flours," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2022.
- [12] D. N. Faridah, W. P. Rahayu, and M. S. Apriyadi, "Peningkatan Pati Resisten Tepung Sorgum Termodifikasi Melalui Siklus Pemanasan-Pendinginan," *JUPI*, vol. 23, no. 1, pp. 10-20, 2018.
- [13] S. Kaur et al., "Influence of dry heat, heat moisture and germination treatments on anti-nutritional and technological quality of sorghum flour," *Food Biomacromolecules*, 2024.
- [14] Kemenperin, "Laporan Kinerja Industri Makanan dan Minuman 2023," Kementerian Perindustrian RI, Jakarta, 2023.
- [15] P. Khunae, T. Tran, and P. Sirivongpaisal, "Effect of Heat-Moisture Treatment on Structural and Thermal Properties of Rice Starches Differing in Amylose Content," *Starch-Starke*, vol. 59, no. 12, pp. 593-599, 2007.
- [16] K. Konyanee and N. Luangsakul, "The impact of heat moisture treatment on physicochemical properties and in

- vitro glycemic index of rice flour," *LWT*, vol. 154, art. 112694, 2022.
- [17] I. Lee and T. Kang, "Heat-Moisture-Treated Rice Starches With Different Amylose and Moisture Contents as Stabilizers for Nonfat Yogurt," *Food Chem.*, vol. 436, art. 137746, 2024.
- [18] H. Li, W. Han et al., "The effect of heat-moisture treatment changed the binding of starch, protein and lipid in rice flour," *Curr. Res. Food Sci.*, 2023.
- [19] J. Liu et al., "Effect of Heat-Moisture Treatment on the Physicochemical Properties of Highland Barley Flour," *Foods*, vol. 11, no. 21, art. 3429, 2022.
- [20] V. Marboh, C. L. Mahanta, and A. Singh, "Comparative Study of Heat-Moisture Treatment and Annealing on Morphology, Crystallinity, Pasting and Thermal Properties," *Starch-Starke*, vol. 74, no. 5-6, art. 2100294, 2022.
- [21] D. W. Marseno, M. Yustinus, and P. Yudi, *Pati Modifikasi*, Yogyakarta: UGM Press, 2022.
- [22] T. T. Nguyen et al., "Heat-Moisture Treatment Further Reduces In Vitro Digestibility and Enhances Resistant Starch Content," *Foods*, vol. 10, no. 11, art. 2613, 2022.
- [23] O. O. Olayinka, K. O. Adebowale, and B. I. Olu-Owolabi, "Effect of heat-moisture treatment on physicochemical properties of white sorghum starch," *Food Hydrocoll.*, vol. 22, no. 2, pp. 225-230, 2008.
- [24] J. Peterson et al., "Impact of heat and high-moisture pH treatments on starch digestibility and phenolic composition in sorghum flour," *Front. Nutr.*, vol. 11, art. 1428542, 2024.
- [25] Q. Sun, Z. Han, L. Wang, and L. Xiong, "Physicochemical differences between sorghum starch and sorghum flour modified by heat-moisture treatment," *Food Chem.*, vol. 145, pp. 756-764, 2014.
- [26] Peraturan BPOM Nomor 33 Tahun 2020 tentang Standar Keamanan dan Mutu Pangan Olahan, BPOM RI, 2020.
- [27] M. I. Syafutri, F. Pratama, F. Syaiful, R. A. Sari, O. Sriutami, and D. Pusvita, "Pengaruh Heat Moisture Treatment terhadap Sifat Fisikokimia Tepung Beras Merah Termodifikasi," *Pangan*, vol. 30, no. 3, pp. 175-186, 2021.
- [28] R. Tanwar, A. Panghal, G. Chaudhary, A. Kumari, and N. Chhikara, "Nutritional, phytochemical and functional potential of sorghum: A review," *Food Chem. Adv.*, vol. 3, art. 100501, 2023.
- [29] N. C. Teixeira et al., "Resistant starch content among several sorghum genotypes and the effect of heat treatment on resistant starch retention," *Food Chem.*, vol. 197, pp. 291-296, 2016.
- [30] T. Wang, Y. Li et al., "Effect of heat-moisture treatment on thermal stability of starch gel and surface adhesiveness of vermicelli," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 223, pp. 786-794, 2022.
- [31] Y. Ren, T. Z. Yuan, C. M. Chigwedere, and Y. Ai, "Heat-moisture treatment to modify structure and functionality and reduce digestibility of pea starches," *Carbohydr. Polym.*, vol. 319, art. 121198, 2023.
- [32] S. Rohaya et al., "Tepung Sorgum Termodifikasi: Difusi Teknologi ke Industri Pangan Indonesia," *ResearchGate*, 2022.
- [33] G. Zhang, Y. Xuan, F. Lyu, and Y. Ding, "Physicochemical properties and starch digestibility of brown rice flour treated with extrusion and heat moisture," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 242, art. 124594, 2023.
- [34] W. Zhang et al., "Optimization of Heat-Moisture Treatment Conditions for High-Amylose Starch and Its Application in Triticale Noodles," *Foods*, vol. 13, no. 17, 2024.
- [35] Y. Zhong et al., "Starch ordered structures control starch reassembly behaviors during HMT for modulating digestibility," *Food Chem.*, vol. 430, art. 136959, 2023.
- [36] N. D. Pratiwi, "Karakterisasi Sifat Fisikokimia Tepung Beras Merah Termodifikasi HMT," *Jurnal Riset Pangan dan Gizi*, 2019.
- [37] T. Norsuwan and M. Thongngam, "The effect of heat-moisture treatment on the molecular changes of starch and protein in high- and low-amylose rice flours and its physicochemical properties," *Food and Applied Bioscience Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 11-30, 2024. [Online]. Available: <https://tci-thaijo.org/fabjournal>
- [38] N. Singh et al., "Effect of Heat Moisture Treatment (HMT) on Physicochemical Characteristics of Sorghum Flour," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 518, art. 012067, 2020.
- [39] Y. Zhang et al., "Improvement of resistant starch content and thermal-stability of starch-linoleic acid complex in extruded recombinant rice," *Food Chem.*, vol. 443, art. 138545, 2024.
- [40] X. Yan, J. Wu, C. Zhao, S. Luo, L. Huang, D. Guo, and C. Liu, "Chinese rice noodles form viscoelastic texture by dual high-temperature retrogradation," *LWT*, vol. 189, art. 115496, 2023.
- [41] C.-S. Lee and H.-J. Chung, "Enhancing resistant starch content of high amylose rice starch through heat-moisture treatment for industrial application," *Molecules*, vol. 27, no. 19, p. 6375, 2022, doi: 10.3390/molecules27196375.
- [42] W. Qi, S. Kong, X. Li, Z. Peng, L. Sun, Z. Wang, and J. Cheng, "Insight into characteristics in rice starch under heat-moisture treatment: Focus on the structure of amylose/amylopectin," *Food Chemistry: X*, vol. 24, p. 101942, 2024, doi: 10.1016/j.fochx.2024.101942.
- [43] V. H. d. A. Ribeiro, M. E. R. M. Cavalcanti-Mata, R. L. J. Almeida, and V. M. d. A. Silva, "Characterization and evaluation of heat-moisture-modified black and red rice starch: Physicochemical, microstructural, and functional properties," *Foods*, vol. 12, no. 23, p. 4222, 2023, doi: 10.3390/foods12234222.

- [44] G. Xiang et al., "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*, vol. 19, p. 100785, 2023, doi: 10.1016/j.fochx.2023.100785.
- [45] R. A. Anggreini, N. A. Choiriyah, and A. Athennia, "Modification of *Sorghum bicolor* (L) moench starch: review of HMT (heat moisture treatment), autoclaving cooling, and annealing methods," *International Journal of Advance Tropical Food*, vol. 3, no. 2, pp. 57–66, 2021