



PENGARUH PENAMBAHAN PATI SAGU TER-PREGELATINISASI TERHADAP RETENSI FE DAN ZN PADA KERNEL BERAS TER-FORTIFIKASI YANG DIBUAT DARI BERAS IR64 DAN IR42

[Effect of Pregelatinized Sago Starch Addition on Fe and Zn Retention in Fortified Rice Kernels made from IR64 and IR42 Varieties]

Abdullah Darussalam^{1,3*}, Yana Cahyana², Herlina Marta², M. Budi Kusarpoko³, Sabirin³

¹ Mahasiswa Pascasarjana Program Magister Teknologi Agroindustri, Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang km 21, Jatinangor, Sumedang, 40600, Indonesia.

² Fakultas Teknologi Industri Pertanian, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang Km. 21, Jatinangor, Sumedang, 40600, Indonesia

³ Research Center for Agroindustry, National Research and Innovation Republic of Indonesia, Jl. Raya Jakarta - Bogor KM 46, Cibinong, Jawa Barat 16911, Indonesia

*Email: abdu023@brin.go.id (Telp: +628127212394)

Diterima tanggal 6 Juli 2025

Disetujui tanggal 21 Juli 2025

ABSTRACT

Indonesia recorded a stunting prevalence of 21.5% in 2023. The World Food Programme (WFP) recommends Fortified Rice Kernels (FRKs) as a reliable source of essential minerals, particularly iron (Fe) and zinc (Zn), for women and children. However, these minerals are often lost during the rice rinsing process. Despite Indonesia's abundant sago resources, their utilization in the food sector remained limited, thereby necessitating innovative strategies for value addition and diversification. This study investigated the effect of incorporating Pregelatinized Sago Starch (PST) into FRK formulations. PST was produced via extrusion at 60–90 °C and 80 rpm, using three different moisture levels: 25% (PST25), 35% (PST35), and 45% (PST45). The dried PST was blended with IR42 (32.85% amylose) and IR64 (27.93% amylose) rice flours, each combined with 7% premix containing micronutrients. FRKs were extruded at 50–85 °C and 31 rpm. The highest Fe retention (91.1%) was observed in FRK produced from IR64 and PST45 at a 4:1 ratio, while the highest Zn retention (99.4%) was found in the IR42–PST35 blend at the same ratio. Additionally, a 3:1 mixture of IR64 and PST35 yielded Zn retention of 98.2%. These findings suggest that high-amylose rice (IR42) is optimally paired with PST35, while lower-amylose rice (IR64) performs best with PST45 to enhance Fe and Zn retention. Supplementary analyses included color attributes, water absorption index, and degree of gelatinization, which are critical for evaluating analog rice quality.

Keywords: Pregelatinized sago starch, fortified rice kernel, iron retention, zinc retention, extrusion

ABSTRAK

Indonesia mencatat angka prevalensi stunting sebesar 21,5% pada tahun 2023. World Food Programme (WFP) merekomendasikan Fortified Rice Kernels (FRK) sebagai sumber mineral esensial yang andal, khususnya zat besi (Fe) dan seng (Zn), bagi perempuan dan anak-anak. Namun, mineral-mineral tersebut sering hilang selama proses pembilasan beras. Meskipun Indonesia memiliki sumber daya sagu yang melimpah, pemanfaatannya dalam sektor pangan masih terbatas, sehingga diperlukan strategi inovatif untuk peningkatan nilai tambah dan diversifikasi produk. Penelitian ini mengkaji pengaruh penambahan Pati Sagu Terpregelatinisasi (PST) dalam formulasi FRK. PST diproduksi melalui proses ekstrusi pada suhu 60–90 °C dan kecepatan 80 rpm, dengan tiga tingkat kadar air berbeda: 25% (PST25), 35% (PST35), dan 45% (PST45). PST kering kemudian dicampur dengan tepung beras IR42 (amilosa 32,85%) dan IR64 (amilosa 27,93%), masing-masing dengan penambahan premiks mikronutrien sebesar 7%. FRK diproduksi melalui ekstrusi pada suhu 50–85 °C dan kecepatan 31 rpm. Retensi Fe tertinggi (91,1%) diperoleh pada FRK yang dibuat dari campuran IR64 dan PST45 dengan rasio 4:1, sedangkan retensi Zn tertinggi (99,4%) ditemukan pada campuran IR42 dan PST35 dengan rasio yang sama. Selain itu, campuran IR64



dan PST35 dengan rasio 3:1 menghasilkan retensi Zn sebesar 98,2%. Temuan ini menunjukkan bahwa beras dengan kadar amilosa tinggi (IR42) paling optimal dikombinasikan dengan PST35, sedangkan beras dengan kadar amilosa lebih rendah (IR64) memberikan hasil terbaik jika dikombinasikan dengan PST45 dalam meningkatkan retensi Fe dan Zn. Analisis tambahan juga dilakukan terhadap atribut warna, derajat penyerapan air, dan tingkat gelatinisasi, yang merupakan parameter penting dalam evaluasi mutu beras analog.

Kata kunci: Pati sagu terpragelatinisasi, *fortified rice kernel*, retensi Fe, retensi Zn, ekstrusi

PENDAHULUAN

Berdasarkan Survey Kesehatan Indonesia tahun 2023, prevalensi stunting di Indonesia adalah 21.5 percent, terutama dalam kelompok anak-anak berusia 2-3 tahun (Munira, 2023). Diantara tantangan dalam menyediakan *fortified rice kernels* (FRK) adalah penyediaan bahan baku, kebiasaan pengolahan beras sebelum pemasakan beras, dan penampilan FRK yang penampilannya sangat mencolok ketika dicampurkan dengan beras alami pada saat pemberian kepada Masyarakat. Fe dan Zn yang dicampurkan dalam FRK rawan terjadi kehilangan ketika pencucian. Selain itu keduanya mengakibatkan perubahan warna menjadi kekuningan mengarah kepada coklat muda. Senyawa besi yang mengandung gugus sulfat mengurangi tingkat keputihan, dan bersama dengan kadar air umpan ekstrusi dan reaksi maillard selama proses ekstrusi akan meningkatkan warna kekuningan selama ekstrusi (Saha *et al.*, 2021).

Studi oleh Sulaiman *et al.* (2022) (Saifullah *et al.*, 2022) memperlihatkan bahwa karakterisasi pati pregelatinisasi, termasuk penyerapan air dan sifat gelatinisasi memiliki peran penting dalam formulasi produk pangan, khususnya dalam penerapannya sebagai aditif dalam tablet farmasi yang membutuhkan sifat disintegrant dan pengikatan yang baik. Di dalam studi oleh Sabirin *et al.* (2024) membuktikan bahwa pati sagu terpregelatinisasi dengan *twin-screw extruder* memperlihatkan sifat fungsional yang berbeda-beda tergantung asal sumber pati sagunya, yang mempengaruhi sifat fisiokimia produk akhir. Oleh karena itu, analisa parameter-parameter ini pada beras analog tidak hanya menyediakan pemahaman yang mendalam terhadap kualitas tetapi juga membantu dalam mengoptimasi proses produksi untuk menghasilkan produk dengan karakteristik yang diinginkan.

Beberapa aspek yang menjadi poin penting untuk melakukannya adalah metode fortifikasi (seperti jenis senyawa besi (Hurrell, 2022) dan gugus fosfor), kondisi proses (seperti suhu head dan proses gelatinisasi) (Syafutri *et al.*, 2020), reaksi maillard, dan sumber asal bahan baku ekstrusi. Dengan suhu ekstrusi di sekitar 86-90°C, pati sagu terpregelatinisasi (PST) yang ditambahkan dapat mempercepat kondisi gelatinisasi dalam campuran umpan pada saat diekstrusi. Penambahan PST dapat mengurangi warna kekuningan gelap dari beras analog karena partikel-partikel PST lebih halus dan memiliki daya hidrasi yang lebih tinggi sehingga pembentukan gel lebih cepat dan merata. PST bisa menjadi pengikat untuk mengurangi penggumpalan yang pada gilirannya mengurangi



perubahan reaksi kimia dalam campuran (Sabirin *et al.*, 2024; Saifullah Sulaiman *et al.*, 2022). Dan akan mengurangi air yang terjebak dalam campuran untuk mengurangi reaksi maillard.

Pati sagu memiliki sineresis yang kuat dan stabilitas panas yang kurang baik, diantara cara untuk meningkatkan sifat patin alami adalah pregelatinisasi (Marta *et al.*, 2022). Sedikit studi yang menggunakan pati sagu terpregelatinisasi untuk penggunaan pangan (Sabirin *et al.*, 2024). Dengan banyaknya tanaman sagu di Indonesia yang potensinya belum dimanfaatkan dengan optimal, maka studi ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh penambahan Pati Sagu Terpregelatinisasi (PST) sebagai campuran umpan pembuatan FRK yang digunakan untuk program stunting di Indonesia. Dalam hal ini PST dicampurkan ke dalam tepung beras untuk memproduksi ekstrudat yang terfortifikasi yang akan membantu meningkatkan retensi Fe dan Zn yang difortifikasi ke dalam FRK.

Studi ini dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik FRK, terutama retensi Fe dan Zn ketika pencucian beras. Selain itu dianalisa juga Water Absorption Index (WAI), warna, dan Derajat Gelatinisasi (DG), yang sangat terkait dengan kualitas dan fungsionalitas dalam pengembangan pangan untuk mendukung program pencegahan stunting.

BAHAN DAN METODE

Ekstrusi dalam pembuatan PST dan pembuatan FRK menggunakan Twin Screw Extruder Twin Screw Extruder Thermoscientific Haake PolyLab PTW24 yang memiliki kapasitas Screw Max 280 rpm 300 Nm, Pmax 100 bar, Tmax 400°C. Bahan dan metode dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa hal sebagai berikut.

Bahan

Pada studi ini, bahan baku yang digunakan adalah beras pera IR42 yang dibeli dari pasar lokal melalui online dan beras IR64 (Setra Ramos) diperoleh dari pasar lokal di sekitar Lokasi riset. Penggunaan beras IR42 dan IR64 adalah untuk melakukan pendekatan terhadap bahan baku beras yang direkomendasikan oleh World Food Program (WFP) yaitu beras pecah, yang pada umumnya di pasaran tercampur di penggilingan beras dari kedua jenis beras tersebut. Pati sagu yang dipakai didapatkan dari pembelian pati sagu alami. Sedangkan premix yang dipakai untuk menyediakan FRK adalah yang biasa digunakan dalam mendukung program stunting di Indonesia, yang dibeli dari DSM Nutritional Products Asia, Singapore. Beras dan PST yang dipergunakan terlebih dahulu ditepungkan dan disaring dengan ukuran 60 mesh.

Penyediaan pati sagu terpregelatinisasi

Pati sagu terpregelatinisasi disediakan dengan mengekstrusi pati sagu alami dengan ekstruder di atas dengan suhu 60-90°C dan kecepatan 80 rpm. Tetapi kadar air bahan baku divariasi terdiri dari 25%, 35%, dan 45% yang selanjutnya ekstrudat yang dihasilkan disimbolkan dengan PST25, PST35, dan PST45.



Produksi bulir beras terfortifikasi (*fortified rice kernel*)

FRK dibuat dengan mengekstrusi campuran PST dibuat tadi dan masing masing kode divariasi masing-masing dengan tepung beras jenis IR42 dengan perbandingan 25%:75% dan 20%:80%. Selanjutnya setiap campuran diatur kadar air campuran 32% MC sebelum ekstrusi. Produk FRK dikeringkan perlahan sampai kadar air 11-14%. Variasi lengkap komposisi campuran umpan ekstrusi menggunakan ekstruder di atas dapat dilihat di Tabel 1.

Pada studi ini, PST dibuat dalam variasi 3 kadar air atau moisture content (MC), yaitu 25% MC selanjutnya dikodekan dengan PST25; 35% MC disimbolkan PST35, dan yang dibuat dengan 45% MC ditandai dengan PST45. Selanjutnya, dalam pembuatan FRK, 25% dari setiap PST dicampurkan dengan 75% tepung beras IR42 (kadar amilosa 32,85%) dan variasi lainnya dicampur dengan tepung beras IR64 (kadar amilosa 27,93%). Dalam variasi berikutnya, FRK dibikin dengan campuran 20% masing-masing dari PST25, PST35 dan PST45 dengan 75% IR42 dan lainnya dengan IR64. Komposisi campuran tersebut dipaparkan di Tabel 1.

Tabel 1 Variasi Komposisi Umpan untuk memproduksi FRK denga cara ekstrusi.

Rasio tepung PST terhadap tepung beras (PST:IR)	Kode Campuran Umpan					
	IR42		IR64			
	PST25	PST35	PST45	PST25	PST35	PST45
25%:75%	A01	B01	C01	D01	E01	F01
20%:80%	A02	B02	C02	D02	E02	F02
Tanpa PS (50% IR42:50%IR64)	G01					

Pengukuran sifat-sifat FRK

Sampel-sampel pengukuran parameter uji FRK dalam bentuk tepung, kecuali pengukuran kecerahan warna dengan mengukur bulir FRK tanpa pengolahan.

Water Absorption Index

Untuk mengukur *water absorption index* (WAI) mengacu pada Dalbhat & Mishra (2019). FRK 0,5 gr dihaluskan menjadi 100 mesh dicampur dengan pengadukan konstan dalam 15 mL air distilasi pada 25°C selama 30 min diikuti dengan sentrifugasi selama 10 menit pada 3.000 rpm. Supernatan dituangkan ke tarred evaporating dish dan dibiarkan mengering dalam oven selama 4 jam pada suhu $100 \pm 5^\circ\text{C}$. Padatan sisanya diukur massanya dan dicatat sebagai WAI dan dinyatakan sebagai g/g sampel kering. Nilai tersebut dihitung dengan persamaan 1.

$$\text{WAI} \left(\frac{\text{g}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Massa gel (g)}}{\text{Massa tepung sampel (g)}} \quad (1)$$



Penampilan warna FRK

Untuk pengukuran warna sampel digunakan colorimeter (CS-10, Hangzhou Caipu Technology Co, Ltd, Hangzhou, Cina) yang dikalibrasi dengan sesuaikan dengan lempeng referensi standar putih dan hitam. Variabel yang akan dievaluasi meliputi L^* (nilai kecerahan), a^* (mewakili kemerahan, di mana nilai positif sesuai dengan warna merah dan nilai negatif sesuai dengan warna hijau), dan b^* (mewakili kekuningan, di mana nilai positif sesuai dengan warna kuning dan nilai negatif sesuai dengan warna biru (Nainggolan *et al.*, 2023).

Hasil yang diperoleh dikonversikan ke derajat Hue, pengukuran tiga ulangan, dinyatakan dalam °Hue. Nilai didapat dari persamaan 2 dan 3 berikut.

$$L^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

$$h^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3)$$

Derajat Gelatinisasi

Derajat Gelatinisasi (DG) FRK ditentukan dengan metode kompleks amilosa-yodium (Baks *et al.*, 2007). Dalam hal ini 0,04 g sampel kering dilarutkan dan diaduk 15 menit dalam 50 ml KOH 0,15 M. Setelah dilakukan sentrifugasi, diambil 1 ml supernatan dan dinetralkan dengan 9 ml 0.017 M HCl. Seterusnya dikompleksasi dengan reagen 0.1 ml yodium. Absorbansi diukur pada 25°C and 600 nm (A1). Langkah tadi diulang untuk 0.40 M KOH tetapi supernatant dinetralkan dengan 0.045 M HCl dan kompleksasi dengan 0,1 ml reagen yodium. Diikuti dengan pengukuran absorbansi pada 25°C and 600 nm (A2). Derajat Gelatinisasi didapat dari perbandingan nilai A1/A2.

Kandungan Besi dan Seng

Kandungan Fe dan Zn pada FRK ditentukan menggunakan Thermo-Scientific™ iCE™ 3500 AAS Atomic Absorption Spectrometer. Sampel uji dipersiapkan dengan melaksanakan destruksi basah dengan asam sulfat sampai larutan menjadi bening, lalu diencerkan dengan aquabidest 10 kali pengenceran (Puchyr & Shapiro, 1986). Konsentrasi sampel uji dipastikan memenuhi *the Cook book* in the Thermo-SOLAAR Software. Setelah sampel siap, selanjutnya dianalisa dengan peralatan di atas. Analisa sampel dilakukan tiga ulangan.

Statistical analysis

Nilai rata-rata $\pm$ deviasi standar (SD) yang dipergunakan didapat dari tiga ulangan pemeriksaan. Nilai yang didapat dianalisa menggunakan independent sample T-test, one-way ANOVA, dilanjutkan dengan uji Duncan test dengan IBM SPSS Statistic 27 untuk mengidentifikasi signifikansi antar nilai rata-rata (p -value < 0.05).



HASIL DAN PEMBAHASAN

Water Absorption Index

Water absorption index (WAI) adalah kemampuan dalam menyerap sejumlah air dan merupakan indikator tingkat pemasakan produk yang diekstrusi. Hasil pengukuran terhadap FRK dengan cara di atas, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. WAI untuk Fortified Rice Kernel yang dibuat dengan variasi campuran pati sagu terpregelatinisasi (PST) dan beras alami.

Komposisi umpan untuk ekstrusi FRK	WAI*	
	Campuran IR42	Campuran IR64
25%PS25	1.820 ± 0,019 ^{e, A}	1,398 ± 0,001 ^{a, B}
25%PS35	2,009 ± 0,054 ^{f, A}	1,729 ± 0,022 ^{d, B}
25%PS45	2,074 ± 0,026 ^{f, g, A}	1,539 ± 0,025 ^{b, B}
20%PS25	1,813 ± 0,003 ^{e, A}	1,391 ± 0,008 ^{a, B}
20%PS35	2,148 ± 0,071 ^{e, A}	1,574 ± 0,080 ^{b, c, B}
20%PS45	1,862 ± 0,0132 ^{e, A}	1,639 ± 0,102 ^{c, B}
50%IR42 + 50%IR64	1,599 ± 0,084 ^{b, c, A}	1,599 ± 0,084 ^{b, c, B}

*Hasil diatas menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0.05$) antara nilai yang berada di kolom yang sama dengan kode huruf yang berlainan. Huruf kecil untuk kode uji ANOVA untuk komposisi PST yang berbeda, sedangkan huruf besar untuk uji T terhadap jenis tepung beras yang berbeda.

Tabel 2 menunjukkan bahwa WAI dari FRK yang terbuat dari campuran PST dan IR42, 25% PST35 dan 25% PST45 terdapat perbedaan nyata dengan varian FRK lainnya yang menggunakan PST. Sedangkan untuk campuran PST dan IR64, FRK yang menggunakan PST45 memiliki perbedaan signifikan dibandingkan dengan varian FRK lainnya. WAI FRK yang dibuat dengan penambahan PST25 memiliki WAI yang lebih rendah dibandingkan dengan PST35 dan PST45. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa dengan meningkatnya kadar air feed, WAI cenderung meningkat, karena keduanya berperan sebagai *plasticizer* dan menurunkan deteriorasi granula pati. WAI umumnya meningkat seiring dengan peningkatan suhu ekstrusi dan mencapai puncak maksimum pada suhu tertentu, lalu menurun, diduga karena meningkatnya dekstrinisasi, tetapi ketika MC mendekati 16%, begitu pula jika kadar air tinggi, tingginya suhu ekstrusi hingga 160°C membuat WAI turun, diduga karena meningkatnya degradasi pati (Hagenimana *et al.*, 2006).

Suhu dan tekanan tinggi mengakibatkan dekstrinisasi dan gelatinisasi pati yang secara signifikan menurunkan penyerapan air (Nakorn *et al.*, 2009). WAI secara tidak langsung mengukur granula pati yang masih



utuh dan yang tergelatinisasi komplut. Makin tinggi gelatinisasi pati, makin tinggi pula WAI ekstrudat. Penurunan WAI dianggap karena adanya pati yang mengalami gelatinisasi ketika diekstrusi lalu menyerap air (Zhu *et al.*, 2010). Meningkatnya kadar air adonan kebanyakan mengurangi waktu pemasakan pasta. Adonan yang rendah kadar air mengakibatkan WAI yang juga rendah dan berperan dalam memperlambat hidrasi produk dan kerusakan sifat pangan. Pengukusan yang lama mengakibatkan meningkatnya gelatinisasi pati dan WAI. Produk yang memiliki WAI tinggi akan lebih efisien untuk membuat kenyang. Studi-studi sebelumnya memperlihatkan hubungan yang kuat antara WAI dan laju gelatinisasi pati (Zarzycki *et al.*, 2017).

Ekstrusi pati sagu dalam *co-rotating twin-screw extruder* pada sistem berkadar air tinggi (34-47%) ternyata membuktikan bahwa gelatinisasi berperan lebih mendasar dalam tehnik yang menggunakan kadar air tinggi dibandingkan peran dekstrinisasi. Solubilitas akan meningkat selama proses seiring berkurangnya penyerapan air. Kemampuan penyerapan air pati sagu lebih tinggi pada ekstrusi (2.73-7.07g/g) dibandingkan dengan sagu alami (sekitar 1.60 g/g berat kering). Namun pada system berkadar air rendah dan tinggi sebanding dengan sumber pati lainnya. WAI dipengaruhi oleh kadar air umpan, suhu barrel, dan kecepatan putar ulir (Gazerani *et al.*, 2017).

Berkurangnya WAI setelah suhu tertentu terutama karena depolimerisasi pati menjadi rantai lebih pendek sehingga solubilitas pati meningkat dan melepaskan produk ekstrudat kering ke dalam air (Sue Shan *et al.*, 2015).

Sementara itu, Tabel 2 memperlihatkan FRK yang dibuat dari campuran beras yang amilosanya lebih tinggi (IR42) menghasilkan WAI lebih tinggi dibandingkan yang dibuat dari campuran tepung beras jenis IR64 yang kadar amilosanya lebih rendah. Penambahan lebih banyak PST45% kepada IR64 sedikit meningkatkan WAI, sedangkan untuk IR42, pengurangan tambahan PST45 dari 25% ke 20% juga sedikit meningkatkan WAI. Hasil ini karena proses ekstrusi memecah struktur kristalin pati dengan memecah ikatan hydrogen antar molekul dan didalam molekul. Sehingga molekul air dapat lebih mudah memasuki daerah amorf dari pati terpregelatinasi dibandingkan pati alami. Gaya geser yang tinggi menghasilkan distribusi ukuran yang lebih luas dari molekul amilosa dan daerah amorf pati, menambah kerusakan struktural kristal, mendorong gelatinisasi pati, dan meningkatnya WAI (Zhang *et al.*, 2023). Sebaliknya umpan yang lebih banyak amilopektin, percabangan amilopektin lebih rentan dirusak gaya geser dibanding amilosa rantai lurus, akibatnya WAI lebih rendah (Abdul Alam *et al.*, 2018).

Colour Appearances

Pengukuran kernel FRK untuk setiap varian menggunakan metode di atas menghasilkan data pada Tabel 3. Tabel 3 menunjukkan penampilan warna untuk FRK yang dibuat dengan campuran PST dan tepung beras IR42, perbedaan yang signifikan hanya terjadi pada FRK yang menggunakan 20% PST 35 dan 20% PST45. Sedangkan untuk yang menggunakan tepung beras IR64, perbedaan yang signifikan terlihat pada campuran 25% PS35 dan 20% PS25.



Mayoritas literatur yang ada mengaitkan warna produk dan penerimaan rasa dengan komponen bahan yang digunakan dalam proses fortifikasi produk. Hanya sedikit penelitian yang dikaitkan dengan variabel proses sebagai alat untuk mengatur warna dan penerimaan sensorik. Faktor-faktor penting yang mempengaruhi kedua parameter ini adalah kadar air feed dan reaksi Maillard. Pada ekstrusi terjadiproses degradasi pati, gaya geser tinggi, suhu rendah, dan kadar air rendah yang menyebabkan senyawa fenolik mudah terekstraksi dan melepaskan senyawa bioaktif dari dinding sel (Saha *et al.*, 2021).

Tabel 3 Perbandingan Tampilan Warna ($^{\circ}$ Hue) untuk kernel FRK dibandingkan beras alami

Komposisi	Warna ($^{\circ}$ Hue)*	
	IR42	IR64
Beras Alami	-	189.53 $\pm$ 0.31 ^{a, A}
25% PST25	192.19 $\pm$ 0.31 ^{b,c,d, A, B}	192.41 $\pm$ 0.22 ^{c,d,e, A, B}
25% PST35	191.88 $\pm$ 0.23 ^{b,c, A, B}	191.58 $\pm$ 0.33 ^{b, A, B}
25% PST45	192.04 $\pm$ 0.09 ^{b,c,d, A}	192.63 $\pm$ 0.27 ^{c,d,e,f, A}
20% PST25	192.31 $\pm$ 0.34 ^{b,c,d,e, A}	193.36 $\pm$ 0.38 ^{f, A}
20% PST35	192.68 $\pm$ 1.25 ^{c,d,e,f, A, B}	192.39 $\pm$ 0.23 ^{c,d,e, A, B}
20% PST45	193.07 $\pm$ 0.11 ^{e,f, A, B}	192.73 $\pm$ 0.35 ^{d,e,f, A, B}
50%IR42 + 50%IR64	197.51 $\pm$ 0.34 ^{g, A}	197.51 $\pm$ 0.34 ^{g, A}

*Hasil diatas menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0.05$) antara nilai yang berada di kolom yang sama dengan kode huruf yang berlainan. Huruf kecil untuk kode uji ANOVA untuk komposisi PST yang berbeda, sedangkan huruf besar untuk uji T terhadap jenis tepung beras yang berbeda.

Pada Tabel 3 juga terlihat, tampilan warna FRK yang paling mendekati warna beras alami adalah campuran 25% PST35 dengan 75% tepung beras IR64, lalu 25% PST35 dengan 75% IR42. Swami (2020) menemukan bahwa perbedaan warna yang lebih kuat mengacu pada produk yang lebih gelap dengan warna kuning dan merah yang lebih pekat. Kadar air yang rendah pada pakan dan suhu yang tinggi meningkatkan perubahan warna total yang disebabkan oleh meningkatnya reaksi pencoklatan. Kecepatan ulir meskipun bukan merupakan parameter yang signifikan, tetapi pada kecepatan yang lebih rendah, sedikit meningkatkan perubahan warna karena waktu tinggal lebih lama yang meningkatkan tingkat reaksi kimia (Swamy, 2020). Yoo *et al.*, (2013) membuktikan bahwa efek warna dari campuran mikronutrien yang ditambahkan dapat mengurangi warna kekuningan FRK secara signifikan hanya dengan setengah dari jumlah fortifikan. Warna produk yang menggunakan beras putih alami, beras panjang, dan ekstrudat bulir beras memiliki nilai kecerahan (L^*) dan kehijauan (a^*) yang sama. Perbedaan warna terutama

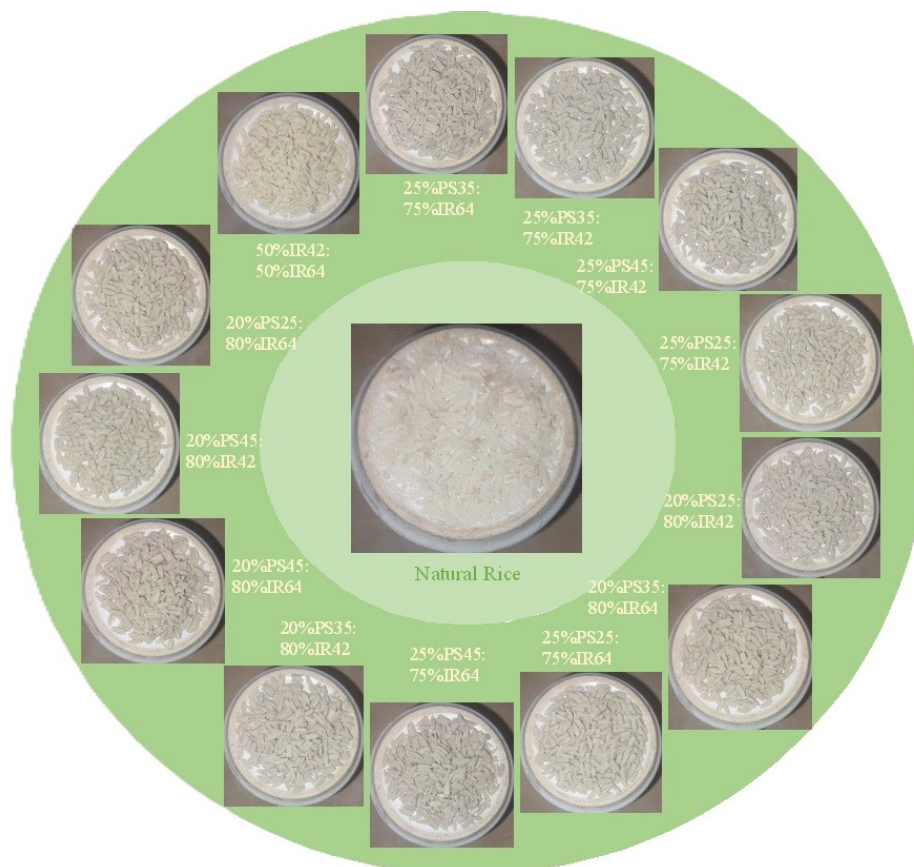


disebabkan oleh warna kekuningan yang lebih kuat, yang disebabkan oleh campuran mikronutrien dan efek Maillard pada saat ekstrusi (Yoo *et al.*, 2013).

Jika kecepatan ulir dan kadar air umpan naik, derajat Hue jadi lebih baik; namun demikian, seiring dengan kenaikan suhu barrel, derajat Hue menurun. Sebaliknya, menurun dengan kenaikan suhu barrel. Peningkatan suhu barrel pada kualitas a^* dan b^* disebabkan oleh degradasi feed karena panas, yang juga dapat mengakibatkan penurunan L^* setelah ekstrusi. Derajat gelatinisasi dan sudut rona memperlihatkan hubungan negatif yang kuat (Rafiq *et al.*, 2018).

Bulir hasil ekstrusi yang diberikan senyawa *ferric pyrophosphate* paling mendekati warna beras alami, tergantung konsentrasinya (Moretti *et al.*, 2005). Warna kecoklatan muda pengaruh dari tingginya $ZnSO_4$, tetapi tidak merubah sifat bulir beras yang lain (Junaid-ur-Rahman, 2020).

Penampilan bulir FRK hasil ekstrusi bisa dilihat didalam Gambar 1.



Gambar 1 Penampilan FRK yang dibuat dengan penambahan PST dibandingkan dengan bulir beras alami.



Degree of Gelatinization

Suhu gelatinisasi berkaitan dengan suhu ketika struktur kristal butiran pati meleleh secara bertahap menjadi bentuk amorf selama proses endotermik. Untuk pati sagu alami, suhu gelatinisasi lebih tinggi daripada pati yang dimodifikasi (Ghalambor *et al.*, 2022). Beras alami biasanya memiliki derajat gelatinisasi (DG) antara 60-85% (Kumari & Roy, 2024). Dalam Tabel 4, Penambahan PST terlihat lebih berpengaruh menurunkan DG FRK yang dibuat dari campuran IR64 dibandingkan yang dari IR42. Hal ini dipengaruhi oleh adanya pati yang sudah terpregelatinisasi sehingga mempercepat ke puncak gelatinisasi dan meningkatkan viskositas (Chakraborty *et al.*, 2022).

Tabel 4. Derajat Gelatinisasi FRK

Komposisi	Derajat Gelatinisasi *, %	
	IR42	IR64
25% PST25	47.31 ± 8.73 ^{e, A, B}	38.86 ± 1.04 ^{c, d, A, B}
20% PST25	63.16 ± 2.70 ^{f, g, A}	16.98 ± 0.90 ^{a, A}
25% PST35	27.04 ± 1.07 ^{b, A}	37.62 ± 1.08 ^{c, d, A}
20% PST35	65.31 ± 8.55 ^{g, A}	41.98 ± 0.51 ^{d, e, A}
25% PST45	58.14 ± 1.19 ^{f, g, A}	33.26 ± 1.85 ^{b, c, A}
20% PST45	57.06 ± 6.39 ^{f, A}	20.06 ± 2.47 ^{a, A}
50%IR42 + 50%IR64	34.49 ± 2.07 ^{c, A}	34.49 ± 2.07 ^{c, A}

*Hasil diatas menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0.05$) antara nilai yang berada di kolom yang sama dengan kode huruf yang berlainan. Huruf kecil untuk kode uji ANOVA untuk komposisi PST yang berbeda, sedangkan huruf besar untuk uji T terhadap jenis tepung beras yang berbeda.

Retensi Besi (Fe)

Dalam penelitian ini, ekstrudat kernel beras difortifikasi dengan premiks dari DSM untuk program stunting WFP, dalam hal ini Fe yang digunakan adalah dalam bentuk ferric pyrophosphate dan Zn sebagai seng oksida. Setiap umpan ekstruder, ditambahkan 7% premix (w/w) pada campuran umpan.

Hasil pengukuran menggunakan Spektrometer Serapan Atom Thermo-Scientific™ iCE™ 3500 AAS dengan menggunakan metode yang dijelaskan di atas tertera pada Tabel 5. Tabel 5 terlihat perbedaan yang cukup signifikan hampir semua varian FRK, hal ini menunjukkan bahwa setiap perubahan perlakuan dan campuran umpan pada saat produksi FRK akan mempengaruhi kesamaan kandungan fortifikasi pada setiap kernel FRK yang dihasilkan. Namun demikian, berdasarkan hasil pengamatan terlihat bahwa secara keseluruhan masih dapat ditoleransi berdasarkan spesifikasi yang dipersyaratkan dalam program stunting WFP.



Pada sebagian besar variasi yang dilakukan dalam penelitian ini, ditemukan bahwa fortifikasi besi menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar air dalam pembuatan pati sagu tergelatinisasi untuk bahan baku FRK, maka semakin baik kemampuan retensi kernel beras. Pengaruh yang lebih signifikan ditemukan ketika jenis beras yang digunakan memiliki kandungan amilosa yang lebih rendah, dalam hal ini IR64. Peningkatan kemampuan retensi untuk beras dengan amilosa lebih tinggi (IR42) juga terlihat, namun pengaruhnya lebih rendah dibandingkan dengan beras dengan amilosa sedang (IR64). Sedangkan untuk PST25 yang dicampur dengan perbandingan 25:75 dengan beras IR42, tidak memiliki banyak efek pada retensi besi setelah pencucian, bahkan jika dibandingkan dengan yang tanpa penambahan PS, beberapa campuran memiliki retensi yang sedikit lebih rendah.

Tabel 5 Data konsentrasi Fe sebelum dan sesudah pembilasan FRK yang diukur dengan *Atomic Absorption Spectroscopy*

Komposisi	Persentase Aktual Fe* (mg/kg)		
	Fe FRK sebelum pembilasan	Fe FRK setelah pembilasan	Persentase retensi F dari FRK setelah pembilasan
25%PST25 + 75%IR42	4224 ± 4 ^j	3378 ± 49 ^B	82.3
20%PST25 + 80%IR42	4203 ± 4 ⁱ	3577 ± 32 ^{D, E}	85.1
25%PST35 + 75%IR42	3894 ± 2 ^b	3295 ± 9 ^A	84.6
20%PST35 + 80%IR42	3872 ± 3 ^a	3381 ± 5 ^B	87.3
25%PST45 + 75%IR42	4022 ± 6 ^f	3401 ± 2 ^B	84.6
20%PST45 + 80%IR42	4147 ± 4 ^h	3606 ± 2 ^E	87.0
25%PST25 + 75%IR64	4233 ± 3 ^j	3534 ± 1 ^C	83.5
20%PST25 + 80%IR64	4251 ± 5 ^k	3531 ± 7 ^C	83.1
25%PST35 + 75%IR64	3924 ± 2 ^d	3368 ± 2 ^B	85.9
20%PST35 + 80%IR64	3996 ± 3 ^e	3557 ± 2 ^{C, D}	89.0
25%PST45 + 75%IR64	4131 ± 4 ^g	3593 ± 2 ^E	87.0
20%PST45 + 80%IR64	3933 ± 6 ^d	3582 ± 2 ^{D, E}	91.1
50%IR42 + 50%IR64	3910 ± 14 ^c	3751 ± 7 ^F	85.7

*Hasil diatas menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0.05$) antara nilai yang berada di kolom yang sama dengan kode huruf yang berlainan. Huruf kecil symbol signifikansi uji ANOVA untuk FRK yang berbeda sebelum pembilasan, sedangkan huruf besar untuk FRK yang berbeda FRK setelah pembilasan.



Peningkatan retensi yang tinggi adalah PST35 dan PST45, dimana pengaruh terbesar pada penelitian ini adalah PST45 dengan rasio campuran 20:80 terhadap IR42 sedangkan untuk PST35 dengan rasio campuran 25:75 terhadap IR64. Kelarutan dalam air dari produk ekstrusi ternyata menurun dengan meningkatnya kadar air bahan baku dan temperatur keluaran die (Genç & Nizamlioğlu, 2025). Pengaruh kenaikan 5% tambahan PST dalam bahan baku FRK dari jenis beras IR64 lebih berpengaruh dibandingkan jika bahan baku FRK jenis beras IR42.

Shubham *et al.* (2020) membuktikan bahwa garam besi seperti *ferric pyrophosphate*, *ferric orthophosphate*, dan bubuk besi dan bubuk besi elemental biasanya tidak aktif dalam makanan kering, sehingga menawarkan manfaat untuk mengurangi reaksi kimia yang tidak menguntungkan yang akan mengubah kualitas sensorik dan umur simpan yang menunjang keberlanjutan pangan.

Ekstrusi FRK dalam kondisi dingin, hangat, dan panas mengubah kristalinitas dan polimorfik pati, serta ukuran domain semi-kristal pati beras yang diekstrusi, sehingga menghasilkan proporsi pati resisten yang lebih besar. Namun, ketersediaan hayati Fe tampak sebanding antara FRK yang diolah dengan ketiga kondisi suhu proses ekstrusi tersebut. Ekstrusi dingin menghasilkan kehilangan mineral yang tinggi ketika beras dimasak dengan air berlebih, atau ketika air berlebih dibuang setelah dimasak, namun ekstrusi panas dan hangat lebih baik dalam retensi Fe (Scheuchzer *et al.*, 2022). Dengan penambahan PST pada campuran umpan menggunakan ekstrusi hangat (warm extrusion) dapat meningkatkan retensi Fe.

Retensi Seng (Zn)

Melalui cara yang sama seperti pada Fe, pengukuran kandungan Zn sebelum dan sesudah pembilasan menggunakan metode di atas dengan larutan standar yang sesuai untuk Zn ditunjukkan pada Tabel 6. Seperti pada Fe, konsentrasi Zn juga menunjukkan perbedaan yang signifikan untuk hampir di setiap varian FRK, hal yang sama menunjukkan bahwa setiap perlakuan dan campuran umpan ekstrusi dalam produksi FRK akan mempengaruhi keseragaman kandungan fortifikasi pada setiap bulir ekstrudat FRK.

Retensi Zn dalam FRK yang diberi umpan tambahan PST, dapat dilihat pada Tabel 6, bahwa PST35 yang dicampur pada rasio 25:75 dengan beras jenis IR64 dan rasio 20:80 dengan jenis IR42 menunjukkan peningkatan retensi Zn yang tinggi. Sedangkan, PST 45 lebih berpengaruh pada FRK dari campuran umpan pada rasio 25:75 dengan IR42. Selain itu, pada sebagian besar penambahan PS dalam campuran umpan membuat FRK sedikit lebih tinggi daripada yang tanpa PS. Zn dapat menghambat penyerapan zat besi, tergantung pada jumlah kedua mineral dan matriks bahan produk fortifikasi tersebut. Tetapi proses ekstrusi, khususnya ekstrusi panas, secara efektif mempertahankan Zn dalam FRK dengan bersusun dalam struktur pati. Hal ini menahan kehilangan Zn selama pencucian dan pemasakan beras, sehingga memastikan retensi dan stabilitas Zn yang tinggi selama penyimpanan FRK (Junaid-ur-Rahman, 2020).



Tabel 6 Data konsentrasi Zn sebelum dan sesudah pembilasan FRK yang diukur dengan *Atomic Absorption Spectroscopy*.

Komposisi	Persentasi Zn Aktual * (mg/kg)		Persentase retensi Zn dari FRK setelah pembilasan
	Zn FRK sebelum pembilasan	Zn FRK setelah pembilasan	
25%PST25 + 75%IR42	1846 ± 0.5 ^k	1730 ± 3.3 ^F	93,7
20%PST25 + 80%IR42	1787 ± 2.3 ^g	1719 ± 2.8 ^E	96,2
25%PST35 + 75%IR42	1800 ± 0.7 ^h	1741 ± 1.4 ^{G, H}	96,7
20%PST35 + 80%IR42	1673 ± 2.5 ^a	1664 ± 1.9 ^B	99,4
25%PST45 + 75%IR42	1700 ± 0.3 ^c	1661 ± 9.8 ^B	97,7
20%PST45 + 80%IR42	1745 ± 0.3 ^e	1674 ± 8.1 ^C	95,9
25%PST25 + 75%IR64	1826 ± 1.5 ^j	1748 ± 0.7 ^E	95,7
20%PST25 + 80%IR64	1824 ± 0.2 ^j	1740 ± 0.4 ^G	95,4
25%PST35 + 75%IR64	1707 ± 1.5 ^d	1678 ± 3.0 ^C	98,2
20%PST35 + 80%IR64	1806 ± 2.9 ⁱ	1716 ± 1.2 ^E	95,0
25%PST45 + 75%IR64	1779 ± 2.2 ^f	1688 ± 4.2 ^D	94,9
20%PST45 + 80%IR64	1690 ± 2.3 ^b	1620 ± 4.0 ^A	95,9
50%IR42 + 50%IR64	1864 ± 2.5 ^l	1776 ± 1.6 ^I	95,3

*Hasil diatas menunjukkan perbedaan nyata ($p < 0.05$) antara nilai yang berada di kolom yang sama dengan kode huruf yang berlainan. Huruf kecil symbol signifikansi uji ANOVA untuk FRK yang berbeda sebelum pembilasan, sedangkan huruf besar untuk FRK yang berbeda FRK setelah pembilasan.

Berdasarkan pembahasan tersebut, terlihat bahwa penambahan pati sagu terpregelatinisasi (PST) ke dalam campuran umpan dalam memproduksi FRK berpengaruh meningkatkan retensi apabila PST dibuat dengan bahan baku berkadar air antara 35% dan 45%. Namun tidak berarti bahwa jumlah PS yang ditambahkan secara otomatis memiliki efek positif tergantung bahan baku beras yang dipakai. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai berapa persen kadar air yang optimal untuk komposisi campuran umpan pembuatan FRK dan berapa persen rasio PST terhadap beras untuk mendapatkan peningkatan retensi yang juga optimal.



KESIMPULAN

Water Absorption Indeks (WAI) dari Bulir Beras Terfortifikasi (FRK) yang dibuat dengan penambahan PST25 memiliki WAI yang lebih rendah dibandingkan dengan PST35 dan PST45, karena pada kadar air umpan ekstrusi yang tinggi (PST35 dan PST45), mengakibatkan tingginya WAI produk FRK, karena PST35 dan PST45 berperan sebagai *plasticizer* dan mengurangi degradasi granula pati, tetapi pada PST yang dibuat dengan kadar air yang lebih rendah (PST25), WAI lebih rendah karena terjadi peningkatan degradasi pati dalam proses ekstrusinya. Pada PST yang dibuat dengan kadar air tinggi 35% dan 45%, gelatinisasi memainkan peran yang lebih tinggi dibandingkan dekstrinisasinya.

Warna bulir beras terfortifikasi (FRK) yang paling mendekati warna beras alami secara berurutan adalah campuran 25% PST35 yang dicampur dengan 75% tepung beras jenis IR64, kemudian diikuti oleh campuran 25% PS35 dengan 75% tepung beras jenis IR42, selanjutnya campuran 25% PST45 dengan 75% tepung beras jenis IR42.

Fortifikasi besi ternyata menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar air dalam pembuatan PST untuk FRK. Pengaruh yang lebih signifikan ditemukan ketika jenis beras yang digunakan memiliki kandungan amilosa yang lebih rendah, dalam hal ini jenis beras IR64. Pengaruh beras pera yang amilosanya tinggi (IR42) terhadap retensi besi lebih rendah dibandingkan dengan beras dengan amilosa sedang (IR64) apabila ditambahkan PST dalam campuran umpan dalam pembuatan FRK.

Untuk retensi Zn pada FRK dibuat dengan mengekstrusi campuran umpan yang ditambahkan PST35 dan PST45 menunjukkan peningkatan retensi yang tinggi. Pengaruh lebih besar untuk campuran dengan tambahan PST35 dengan rasio 1:3 untuk kedua beras jenis IR64 dan jenis beras IR42. Adapun untuk jenis beras IR42 yang dicampur dengan PST45 lebih besar pengaruhnya. Dengan demikian penambahan pati sago pregelatinisasi (PST) ke dalam campuran umpan dalam pembuatan FRK adalah PST yang dibuat dengan kadar air 35% - 45%.

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai berapa persen kadar air yang optimal untuk menjadi campuran pakan untuk pembuatan FRK dan berapa persen rasio PS terhadap beras untuk mendapatkan peningkatan retensi yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Alam, N. A., Karim, R., & Muhammad, K. 2018. Effect of sago and tapioca starches on the physicochemical and textural properties of expanded rice. *International Food Research Journal*, 25(1): S21–S27.
- Baks, T., Ngene, I. S., van Soest, J. J. G., Janssen, A. E. M., & Boom, R. M. 2007. Comparison of methods to determine the degree of gelatinisation for both high and low starch concentrations. *Carbohydrate Polymers*, 67(4): 481–490. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.06.016>



- Chakraborty, I., N. P., Mal, S. S., Paul, U. C., Rahman, M. H., & Mazumder, N. 2022. An Insight into the Gelatinization Properties Influencing the Modified Starches Used in Food Industry: A review. In Food and Bioprocess Technology 15(6): 1195–1223. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02761-z>
- Dalbhat, C. G., & Mishra, H. N. 2019. Effects of extrusion process conditions on system parameters; physicochemical properties and cooking characteristics of extruded fortified rice kernels. Journal of Cereal Science, 89(May), 102782. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.05.016>
- Gazerani, S., Mortazavi, S., Milani, E., Rad, A. E., & Koochaki, A. 2017. Asian Journal of Biological and Life Sciences Physical and functional evaluation of puffed snack prepared from whole oleaster powder and navy bean powder. Asian Journal of Biological and Life Sciences, 6(3).
- Genç, H., & Nizamlioğlu, N. M. 2025. Sensory Properties, Textural Analysis, and Some Physical Analysis of Enriched Extruded Products Produced from Different Grain Products. Plant Foods for Human Nutrition, 80(2): 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11130-025-01336-5>
- Ghalambor, P., Asadi, G., Nafchi, A. M., & Ardebili, S. M. S. 2022. Investigation of dual modification on physicochemical, morphological, thermal, pasting, and retrogradation characteristics of sago starch. Food Science and Nutrition, 10: 2285–2299. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2837>
- Hagenimana, A., Ding, X., & Fang, T. 2006. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. Journal of Cereal Science, 43(1): 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.09.003>
- Hurrell, R. F. 2022. Ensuring the Efficacious Iron Fortification of Foods: A Tale of Two Barriers. Nutrients, 14(8). <https://doi.org/10.3390/nu14081609>
- Junaid-ur-Rahman, S. 2020. Fortification of Rice with Iron and Zinc-A Tool to Improve Nutritional Profile of Rice for Intended Consumers. Scholarly Journal of Food and Nutrition, 3(3). <https://doi.org/10.32474/sjfn.2020.03.000162>
- Kumari, A., & Roy, A. 2024. Impact of the degree of starch gelatinization on the texture, soaking, and cooking characteristics of high amylose rice: an experimental and numerical study. Journal of Food Measurement and Characterization, 18(10): 8200–8217. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02794-2>
- Marta, H., Hasya, H. N. L., Lestari, Z. I., Cahyana, Y., Arifin, H. R., & Nurhasanah, S. 2022. Study of Changes in Crystallinity and Functional Properties of Modified Sago Starch (*Metroxylon* sp.) Using Physical and Chemical Treatment. Polymers, 14(22). <https://doi.org/10.3390/polym14224845>
- Moretti, D., Lee, T.-C., Zimmermann, M. B., Nuessli, J., & Hurrell, R. F. 2005. Development and Evaluation of Iron-fortified Extruded Rice Grains. S330 Journal of Food Science, 70(5). www.ift.org
- Nainggolan, E. A., Banout, J., & Urbanova, K. 2023. Chemical and Thermal Treatment for Drying Cassava Tubers: Optimization, Microstructure, and Dehydration Kinetics. Life, 13(12). <https://doi.org/10.3390/life13122355>
- Nakorn, K. N., Tongdang, T., & Sirivongpaisal, P. 2009. Crystallinity and rheological properties of pregelatinized rice starches differing in amylose content. Starch/Staerke, 61(2): 101–108. <https://doi.org/10.1002/star.200800008>
- Puchyr, R. F., & Shapiro, R. 1986. Determination of trace elements in foods by HCl-HNO₃ leaching and flame atomic absorption spectroscopy. Journal - Association of Official Analytical Chemists, 69(5): 868–870. <https://doi.org/10.1093/jaoac/69.5.868>
- Rafiq, A., Sharma, S., & Singh, B. 2018. Effect of pregelatinization on rheology, cooking and antioxidant activity of pasta. Journal of Food Science and Technology, 55(5): 1756–1766. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3089-y>



- Sabirin, Sitanggang, A. B., Budijanto, S., Kusarpoko, M. B., Darussalam, A., Purwoto, A. S., & Pramana, Y. S. 2024. Characteristics of partially pregelatinized sago starch from Bangka, Riau, and Papua extruded using twin-screw extruder. *Journal of Food Measurement and Characterization*. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02454-5>
- Saha, S., Jha, S., Tiwari, A., Jayapalan, S., & Roy, A. 2021. Considerations for improvising fortified extruded rice products. *Journal of Food Science*, 86(4): 1180–1200. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15656>
- Saifullah Sulaiman, T. N., Bestari, N., & Aziza, F. N. 2022. Preparation and Characterization of Pregelatinized Sago Starch (PSS) from Native Sago Starch (NSS) (*Metroxylon* sp.) and its Evaluation as Tablet Disintegrant and Filler-Binder on Direct Compression Tablet. *Indonesian Journal of Pharmacy*, 32(2): 251–260.
- Scheuchzer, P., Zimmerman, M. B., Zeder, C., Sánchez-Ferrer, A., & Moretti, D. 2022. Higher Extrusion Temperature Induces Greater Formation of Less Digestible Type V and Retrograded Starch in Iron-Fortified Rice Grains But Does Not Affect Iron Bioavailability: Stable Isotope Studies in Young Women. *Journal of Nutrition*, 152(5): 1220–1227. <https://doi.org/10.1093/jn/nxab435>
- Shubham, K., Anukiruthika, T., Dutta, S., Kashyap, A. V., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. 2020. Iron deficiency anemia: A comprehensive review on iron absorption, bioavailability and emerging food fortification approaches. *Trends in Food Science and Technology*, 99: 58–75. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.021>
- Sue Shan, L., Sulaiman, R., Sanny, M., & Nur Hanani, Z. A. 2015. Effect of extrusion barrel temperatures on residence time and physical properties of various flour extrudates. *International Food Research Journal*, 22(3): 965–972.
- Swamy, G. J. 2020. Understanding The Effect Of Single-and Twin-Screw Extrusion Processing Parameters on Physical and Physico-Chemical Properties of Sprouted Quinoa and Sprouted Proso Millets. South Dakota State University.
- Syafutri, M. I., Syaiful, F., Lidiasari, E., Pusvita, D., & Astari, E. I. 2020. Color, Microstructure and Crystallinity of Red Rice Flour with Differences in Drying Times and Temperatures. *The 1st International Conference On Health, Social, Sciences, and Technology (ICoHSST 2020)*.
- Syarifah Liza Munira. 2023. 2023 Indonesian Health Survey. <https://www.badankebijakan.kemkes.go.id/ski-2023-dalam-angka/>
- Yoo, J., Alavi, S., Adhikari, K., Haub, M. D., Aberle, R. A., & Huber, G. 2013. Rice-shaped extruded kernels: Physical, sensory, and nutritional properties. *International Journal of Food Properties*, 16(2): 301–321. <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.495042>
- Zarzycki, P., Sobota, A., Kuzawińska, E., Wirkijowska, A., & Sykut-Domańska, E. 2017. Estimation Of Degree of Starch Gelatinisation In Instant Pasta Using Measurements of Viscosity And Water Absorption Of Ground Instant Pasta Dispersions. *Acta Agroph*, 24(4): 625–632.
- Zhang, Z., Zhu, M., Xing, B., Liang, Y., Zou, L., Li, M., Fan, X., Ren, G., Zhang, L., & Qin, P. 2023. Effects of extrusion on structural properties, physicochemical properties and in vitro starch digestibility of Tartary buckwheat flour. *Food Hydrocolloids*, 135(80): 108197. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108197>
- Zhu, L. J., Shukri, R., De Mesa-Stonestreet, N. J., Alavi, S., Dogan, H., & Shi, Y. C. 2010. Mechanical and microstructural properties of soy protein - High amylose corn starch extrudates in relation to physiochemical changes of starch during extrusion. *Journal of Food Engineering*, 100(2): 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.004>