

Pengaruh *Heat Moisture Treatment* Menggunakan *Microwave* dengan Penambahan Gliserol Terhadap Karakteristik Fisikokimia Tapioka

The Effect of Heat Moisture Treatment Using a Microwave with the Addition of Glycerol on the Physicochemical Characteristics of Tapioca

Rudi Kelirey, Febby J. Polnaya*, Syane Palijama

Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Ambon 97234 Indonesia

*Penulis korespondensi e-mail: febby.polnaya@lecturer.unpatti.ac.id

ABSTRACT

Keywords: Heat-moisture treatment; Glycerol concentration; Microwave modification; Physicochemical properties; Tapioca starch

This study investigated the effect of glycerol concentration on the physicochemical properties of tapioca starch modified through heat-moisture treatment (HMT) using microwave heating. Glycerol was incorporated at concentrations of 5% (HMTg5), 10% (HMTg10), and 15% (HMTg15) based on the dry weight of tapioca starch, with conventional HMT-modified starch serving as the control. The experiment was conducted using a completely randomized design with a non-factorial structure. The analyzed physicochemical parameters included ash content, water absorption capacity, oil absorption capacity, swelling power, solubility, bulk density, and whiteness index. The results revealed that the water and oil absorption capacities of HMTg starches were significantly higher than those of the control HMT starch. In contrast, ash content, swelling power, solubility, bulk density, and whiteness index decreased with increasing glycerol concentration. These findings suggest that incorporating glycerol during HMT modification alters the starch granule structure and intermolecular interactions, resulting in improved water and oil affinity while reducing swelling and solubility. The modified starches produced in this study demonstrate promising potential for food processing applications and as functional ingredients in biodegradable polymer formulations.

ABSTRAK

Kata Kunci: Heat moisture treatment; Konsentrasi gliserol; Modifikasi microwave; Pati tapioka; Sifat-sifat fisiko-kimia

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh konsentrasi gliserol terhadap sifat fisikokimia pati tapioka yang dimodifikasi melalui metode *heat moisture treatment* (HMT) dengan bantuan pemanasan *microwave*. Gliserol ditambahkan dengan konsentrasi 5% (HMTg5), 10% (HMTg10), dan 15% (HMTg15) berdasarkan berat kering pati tapioka, sedangkan pati hasil modifikasi HMT tanpa gliserol digunakan sebagai kontrol. Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap non-faktorial. Parameter fisikokimia yang dianalisis meliputi kadar abu, daya serap air, daya serap minyak, kemampuan menggelembung, kelarutan, kerapatan kamba, dan tingkat kecerahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya serap air dan daya serap minyak pati HMTg lebih tinggi dibandingkan dengan pati HMT kontrol. Sebaliknya, kadar abu, kemampuan menggelembung, kelarutan, kerapatan kamba, dan tingkat kecerahan cenderung menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi gliserol. Temuan ini mengindikasikan bahwa penambahan gliserol selama proses modifikasi HMT menyebabkan perubahan struktur granula pati serta interaksi antar molekul, yang berkontribusi pada peningkatan afinitas terhadap air dan minyak, namun menurunkan kemampuan mengembang dan kelarutan. Pati termodifikasi yang dihasilkan berpotensi diaplikasikan dalam industri pangan dan sebagai bahan fungsional pada formulasi polimer *biodegradable*.

PENDAHULUAN

Potensi ketersediaan pangan lokal di Indonesia sangat melimpah, diantaranya adalah umbi-umbian. Pemanfaatan pati alami dari umbi-umbian dalam industri pangan dibatasi oleh sifat fisikokimianya. Menurut Picauly *et al.* (2017) setiap metode modifikasi pati akan menghasilkan pati termodifikasi dengan sifat fisikokimia yang berbeda. Karakteristik fisikokimia dan fungsionalnya pati tapioka dapat ditingkatkan dengan metode modifikasi, salah satunya yaitu modifikasi *heat moisture treatment* (HMT). Menurut Kusnandar (2010) untuk mengatasi masalah sifat pati alami yang sulit diaplikasikan dalam pengolahan pangan, maka pati alami sering dimodifikasi agar menghasilkan pati yang memiliki sifat-sifat reologi berbeda dari pati alami sehingga dapat memperluas penggunaannya dalam pengolahan pangan serta menghasilkan karakteristik produk yang diinginkan.

Modifikasi pati dapat dilakukan baik secara fisik, kimia maupun enzimatis. Dari ketiga modifikasi tersebut, yang paling efisien untuk digunakan adalah modifikasi secara fisik dengan menggunakan panas lembab atau HMT. Proses modifikasi pati dengan metode HMT menggunakan batasan kadar air yang rendah, yaitu lebih kecil (<35%) dengan suhu pemanasan yang lebih tinggi dari suhu gelatinisasi pati (Collado *et al.*, 2001). Modifikasi yang dilakukan akan menggunakan *microwave* sebagai pemanas. Menurut Drouzas *et al.* (1999) pemanas *microwave* dapat menurunkan kadar bahan pangan dalam kurung waktu yang singkat serta mampu meningkatkan kualitas bahan kering. Modifikasi HMT dengan pemanasan *microwave* (MW) dapat meningkatkan daya serap air, menurunkan kristalinitas, dan kemampuan menggelembung granula.

Karakteristik fisikokimia dan fungsional pati yang dimodifikasi dengan metode HMT sangat beragam dan dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis (sumber) pati, kadar amilosa dan tipe kristalisasi pati. Karakteristik pati modifikasi metode HMT juga dipengaruhi oleh kondisi proses seperti suhu, kadar air, pH dan lama waktu pemanasan. Gunaratne & Hoover (2002) menambahkan bahwa mengenai jenis bahan baku, ada beberapa faktor yang mempengaruhi sifat fisikokimia dan fungsional pati HMT antara lain sumber pati, kandungan amilosa, dan proses kristalisasi pati.

Untuk meningkatkan sifat fisikokimia pati memerlukan penambahan bahan pendukung lainnya seperti plasticizer dan biopolimer untuk perbaikan sifat fisikokimia dan sifat mekanik. Untuk mengatasi kekurangan dari pati dapat ditambahkan dengan zat pemlastis (*plasticizer*) guna mengatasi proses degradasi yang disebabkan oleh berbagai faktor, seperti sinar matahari, panas, dan faktor alam. Dalam hal ini digunakanlah gliserol sebagai *plasticizer*. Selain itu, penambahan *plasticizer* diharapkan dapat membuat kekakuan biopolimer tersebut menjadi berkurang. *Plasticizer* yang digunakan adalah gliserol, karena gliserol merupakan bahan yang murah, sumbernya mudah diperoleh, dapat diperbaharui dan juga mudah terdegradasi oleh alam. Gliserol dapat memperlemah kekakuan dari polimer sekaligus meningkatkan fleksibilitas dan ekstensibilitas polimer (Tarique *et al.*, 2021).

Secara mekanistik, HMT pada kadar air rendah (<35%) memacu reorganisasi domain kristalin dan amorf pati melalui rekonstruksi ikatan hidrogen intra/inter-molekul, sehingga menaikkan ketahanan termal dan menurunkan kemampuan pengembangan granula. Pemanasan *microwave* mempercepat proses ini karena pemanasan dielektrik bersifat volumetrik: rotasi dipol air/gliserol dan migrasi ionik menghasilkan pemanasan cepat dan merata, menurunkan energi aktivasi transisi kaca (T_g) serta memfasilitasi mobilitas rantai pada jangka waktu singkat. Ketika gliserol hadir sebagai *plasticizer*, gugus -OH-nya membentuk ikatan hidrogen kompetitif dengan -OH pati (amilosa/amilopektin), memperlebar jarak antarrantai dan menciptakan mikro-void saat pengeringan. Kombinasi HMT-MW dengan penambahan gliserol ini diprediksi meningkatkan afinitas terhadap air/minyak namun membatasi pengelembungan dan daya larut karena terbentuknya kompleks inklusi amilosa-gliserol dan naiknya keteraturan parsial (kristalinitas) granula. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji pengaruh konsentrasi gliserol terhadap sifat fisikokimia pati tapioka yang dimodifikasi melalui metode HMT dengan bantuan pemanasan *microwave*.

METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan penelitian utama yang di gunakan dalam penelitian ini adalah pati tapioka komersial (*Rose Brand*) yang didapatkan di gerai komersial di Desa Poka, Kota Ambon.

Modifikasi Pati Tapioka HMTg

Pati tapioka HMTg di preparasi berdasarkan metode yang dikemukakan Juansang *et al.* (2016). Persiapkan terlebih dahulu larutan gliserol dengan konsentrasi 0, 5, 10, dan 15%. Timbang 100 g pati kedalam elemeyer, kemudian tambahkan 100 mL larutan gliserol dan dibiarkan selama 24 jam pada suhu 25 °C dengan pengadukan konstan menggunakan *shaker water bath* (Memmert). Setelah 24 jam pengadukan, pengendapan pati dilakukan dengan bantuan pompa vakum (Orion). Modifikasi HMT menggunakan *microwave oven* (Kris) dengan pemanasan selama 30 menit dengan power 10%. Pati termodifikasi lalu di keringkan menggunakan pengering kabinet pada suhu 40 °C selama 12 jam. Pati kering dihancurkan menggunakan lumpang, kemudian dilanjutkan pengayakan dengan ukuran ayakan 100 mesh, untuk menyeragamkan ukuran.

Kadar Abu Pati

Penentuan kadar abu dilakukan berdasarkan metode yang direkomendasikan oleh AOAC (2012). Cawan porselen terlebih dahulu dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 2 jam untuk menghilangkan kelembapan, kemudian didinginkan dalam desikator selama 10 menit dan ditimbang hingga diperoleh bobot konstan. Sebanyak 2 g sampel dimasukkan ke dalam cawan tersebut, kemudian dipanaskan perlahan di atas pemanas listrik hingga asap tidak lagi keluar, guna menghindari kehilangan sampel akibat pembakaran langsung. Selanjutnya, cawan berisi sampel dimasukkan ke dalam tanur pengabuan dan diabukan pada suhu 600 °C selama 5 jam hingga diperoleh residu berwarna keabu-abuan. Setelah proses pengabuan selesai, cawan didinginkan kembali dalam desikator selama 10–15 menit dan ditimbang hingga mencapai bobot konstan. Kadar abu dihitung berdasarkan perbandingan massa residu abu terhadap massa awal sampel kering, dan dinyatakan dalam persentase (%).

Daya Serap Air

Pengujian daya serap air dilakukan mengacu pada metode Kim & Huber (2013) dengan beberapa modifikasi. Sebanyak 0,2 g pati ditimbang dan disuspensikan dalam 5 mL akuades di dalam tabung sentrifus. Suspensi kemudian divorteks selama 1 menit untuk memperoleh dispersi yang homogen. Setelah itu, suspensi pati dibiarkan pada suhu ruang selama 10 menit agar terjadi penyerapan air secara optimum. Selanjutnya, suspensi disentrifugasi pada kecepatan 1000 rpm selama 15 menit. Supernatan yang terbentuk dibuang dengan hati-hati, sedangkan endapan yang diperoleh ditimbang untuk menentukan jumlah air yang terserap. Daya serap air dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\text{Daya serap air (\%)} = (w_1 / w_0) \times 100\% \quad \dots (1)$$

Keterangan: w_0 = Berat awal (g) sampel sebelum perlakuan; w_1 = berat endapan (g)

Daya Serap Minyak

Pengujian daya serap minyak dilakukan berdasarkan metode yang dikemukakan oleh Lazou & Krokida (2010) dengan beberapa modifikasi. Sebanyak 0,5 g sampel pati dimasukkan ke dalam tabung sentrifus, kemudian ditambahkan 3 mL minyak goreng (misalnya minyak kedelai). Campuran tersebut divorteks selama 1 menit untuk memperoleh dispersi yang homogen, lalu dibiarkan selama 30 menit pada suhu ruang agar terjadi interaksi antara minyak dan partikel pati. Selanjutnya, tabung disentrifugasi pada kecepatan 3000 rpm selama 25 menit. Supernatan dibuang dengan hati-hati, sedangkan endapan yang tersisa ditimbang untuk menentukan jumlah minyak yang terserap. Daya serap minyak dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$\text{Daya serap minyak (\%)} = (w_1 / w_0) \times 100\% \quad \dots (2)$$

Keterangan: w_0 = Berat awal (g) sampel sebelum perlakuan; w_1 = berat endapan (g)

Kemampuan menggelembung dan Daya Larut

Pengujian kemampuan menggelembung dan daya larut pati dilakukan berdasarkan metode Adebawale *et al.* (2009) dengan beberapa modifikasi. Sebanyak 1% (b/v) suspensi pati disiapkan dengan melarutkan

sampel dalam akuades di dalam tabung reaksi yang telah diketahui berat kosongnya (w_1). Tabung berisi suspensi kemudian dipanaskan dalam penangas air pada suhu 95 °C selama 30 menit sambil diaduk secara berkala untuk mencegah penggumpalan. Setelah pemanasan, suspensi didinginkan hingga mencapai suhu kamar (± 27 °C). Selanjutnya, suspensi disentrifugasi pada kecepatan 5000 rpm selama 15 menit hingga terpisah antara residu (endapan) dan supernatan. Endapan yang diperoleh ditimbang (w_2) untuk menentukan kemampuan menggelembung pati. Nilai kemampuan menggelembung pati (berdasarkan berat kering) dihitung dengan Persamaan 3.

$$\text{Kemampuan menggelembung (g/g)} = \frac{w_2 - w_1}{\text{Berat Sampel}} \quad \dots (3)$$

Keterangan: w_1 = berat tabung kosong (g); w_2 = berat tabung + endapan setelah sentrifugasi (g)

Sebanyak 10 mL dari supernatan diambil sebagai alikuot, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C hingga mencapai berat konstan. Residu yang tertinggal setelah pengeringan menunjukkan jumlah pati yang larut dalam air, dan daya larut dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$\text{Daya larut (\%)} = \frac{(\text{Berat sampel kering}) - (\text{berat cawan kosong})}{\text{Berat Sampel}} \times 100\% \quad \dots (4)$$

Densitas Kamba

Penentuan densitas kamba dilakukan berdasarkan metode yang dikemukakan oleh Khalil (1999). Sampel pati dimasukkan ke dalam cawan piknometer berkapasitas 10 mL hingga penuh tanpa dilakukan pemadatan. Setelah itu, cawan berisi sampel ditimbang untuk memperoleh massa total. Densitas kamba dihitung dengan membagi massa pati dengan volume ruang yang ditempati.

Tingkat Kecerahan Warna

Pengukuran tingkat kecerahan warna dilakukan mengacu pada metode menggunakan alat *chromameter*. Sampel pati diletakkan secara merata dalam wadah datar, kemudian *measuring head* dari alat ditempatkan di atas permukaan sampel dan tombol *measure* ditekan untuk memulai pengukuran. Pengukuran dilakukan pada tiga titik berbeda di permukaan sampel untuk memperoleh hasil yang representatif.

Analisis Data

Data hasil pengujian sifat fisikokimia pati tapioka hasil modifikasi *Heat-Moisture Treatment* berbasis gelombang mikro (HMT-MW) dengan variasi konsentrasi gliserol dianalisis secara statistik menggunakan analisis ragam nonfaktorial. Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Minitab versi 20. Apabila hasil analisis menunjukkan adanya pengaruh nyata terhadap parameter yang diamati, maka dilanjutkan dengan uji lanjut Tukey pada taraf signifikansi 95% ($\alpha = 0,05$) untuk mengetahui perbedaan antarperlakuan secara lebih spesifik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar Abu

Kadar abu merupakan parameter penting dalam analisis proksimat yang menggambarkan kandungan total mineral anorganik yang tertinggal setelah proses pembakaran komponen organik suatu bahan. Abu terbentuk dari residu hasil pengabuan yang umumnya terdiri atas mineral seperti kalsium, fosfor, kalium, magnesium, dan natrium, serta beberapa unsur logam lainnya (Thy et al., 2013). Kandungan abu sangat dipengaruhi oleh jenis bahan, proses pengeringan, dan kondisi pengabuan, termasuk suhu dan lama waktu pembakaran. Pada suhu 600 °C, seluruh komponen organik seperti protein, lemak, dan karbohidrat mengalami oksidasi sempurna, meninggalkan residu anorganik berupa abu (Hartanto, 2012).

Rentang kadar abu pati tapioka hasil modifikasi HMT dan HMTg berkisar antara 0,05–0,31% (Tabel 1), di mana perlakuan HMTg15 menunjukkan kadar abu terendah (0,05%), sedangkan perlakuan HMT tanpa penambahan gliserol memiliki kadar abu tertinggi (0,31%). Hasil ini menunjukkan adanya tren penurunan kadar abu seiring dengan peningkatan konsentrasi gliserol. Analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan

memberikan pengaruh nyata terhadap kadar abu ($p < 0,05$), dan berdasarkan uji lanjut Tukey, perlakuan HMTg15 berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan lainnya (Tabel 1).

Tabel 1. Kadar abu pati Tapioka HMT dengan variasi konsentrasi gliserol

Perlakuan	Kadar Abu (%)
HMT	0,31 ^a
HMTg5	0,14 ^b
HMTg10	0,11 ^b
HMTg15	0,05 ^c

Keterangan: Huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Tukey pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

Penurunan kadar abu seiring peningkatan konsentrasi gliserol menunjukkan bahwa modifikasi HMT dengan penambahan gliserol berpotensi menurunkan kandungan mineral pada pati tapioka. Hal ini diduga akibat proses pemanasan dengan *microwave* yang mengakibatkan terdegradasinya sebagian komponen anorganik atau terjadinya pelarutan mineral selama perlakuan panas. Ayele *et al.* (2015) menyatakan bahwa pemanasan pada suhu tinggi dapat menyebabkan dekomposisi komponen mineral, sedangkan Akpa & Dadge (2012) menjelaskan bahwa beberapa mineral volatil dapat menguap atau terurai pada suhu di atas 500 °C. Selain itu, gliserol yang bersifat higroskopis dapat berinteraksi dengan gugus hidroksil pati, mempengaruhi kestabilan struktur matriks granula dan mempercepat proses degradasi termal komponen anorganik (Ajiya *et al.*, 2017).

Perlakuan HMT menghasilkan kadar abu terendah (0,51%), dan perlakuan HMTg5 menghasilkan kadar abu tertinggi (0,84%). Perbedaan ini dapat disebabkan oleh variasi sumber pati, kondisi kelembapan awal, serta durasi dan intensitas pemanasan yang digunakan selama proses modifikasi. Namun demikian, kadar abu yang diperoleh dalam penelitian ini masih memenuhi standar mutu SNI 01-3729-1995, yang mensyaratkan kadar abu maksimum sebesar 0,5% untuk tepung tapioka.

Dalam konteks industri pangan, kadar abu merupakan indikator mutu yang penting karena berkaitan dengan kemurnian bahan dan kandungan mineral yang tersisa. Kadar abu yang tinggi dapat menurunkan kualitas produk karena berpotensi menyebabkan perubahan warna, rasa, dan stabilitas penyimpanan tepung (Sulistyoningsih *et al.*, 2019). Oleh karena itu, nilai kadar abu yang rendah pada pati hasil modifikasi menunjukkan tingkat kemurnian yang baik dan sesuai dengan karakteristik pati yang diharapkan untuk aplikasi dalam produk pangan maupun non-pangan seperti bahan biodegradable (Amarawwera *et al.*, 2021).

Tabel 2. Karakteristik sifat-sifat fisik pati tapioka HMT dengan variasi konsentrasi gliserol

Perlakuan	Daya serap air (%)	Daya serap minyak (%)	Kemampuan menggelembung (g/g)	Daya larut (%)	Densitas Kamba (g/mL)	Derajat Putih (%)
HMT	1,84 ^b	1,93 ^b	33,42 ^a	17,38 ^a	5,36 ^{ab}	3,91 ^{ab}
HMTg 5	2,01 ^b	1,93 ^b	29,98 ^{ab}	9,74 ^b	6,25 ^a	4,20 ^a
HMTg10	2,11 ^b	2,03 ^{ab}	27,95 ^b	8,60 ^b	4,96 ^{ab}	3,78 ^{ab}
HMTg15	2,67 ^a	2,13 ^a	25,55 ^b	7,02 ^b	4,58 ^b	3,53 ^b

Keterangan: Huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Tukey pada taraf kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

Daya Serap Air

Daya serap air mencerminkan kapasitas pati untuk menyerap dan menahan air dalam kondisi tanpa pemanasan, yang dalam konteks pati sangat dipengaruhi oleh struktur granula serta interaksi molekuler antara rantai karbohidrat dan pelarut air (Nafi *et al.*, 2015). Pada penelitian ini, hasil menunjukkan bahwa nilai absorpsi air bagi pati tapioka yang dimodifikasi dengan metode HMT-MW dan variasi gliserol berkisar antara 1,84 % hingga 2,67 % (Tabel 2). Perlakuan tanpa gliserol (HMT) menghasilkan nilai terendah yaitu 1,84%, sedangkan perlakuan dengan konsentrasi gliserol tertinggi (HMTg15) menunjukkan nilai tertinggi yaitu 2,67%. Hasil analisis ragam menunjukkan pengaruh nyata ($p < 0,05$), dan uji Tukey mengindikasikan bahwa perlakuan HMTg15 berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya (Tabel 2).

Peningkatan absorpsi air seiring dengan peningkatan konsentrasi gliserol ini sejalan dengan mekanisme bahwa gliserol sebagai *plasticizer* dapat memasuki struktur granula pati, memutus sebagian ikatan hidrogen intra-molekular dan meningkatkan mobilitas rantai pati, sehingga menciptakan ruang bebas yang lebih luas untuk penetrasi molekul air (Kim & Huber, 2013). Plastikasi oleh gliserol meningkatkan hidrofilisitas sistem, karena gugus hidroksil dari gliserol dapat berinteraksi dengan air, sehingga memfasilitasi penyerapan air (Tarique *et al.*, 2021). Penelitian oleh Basiak *et al.* (2018) menunjukkan bahwa peningkatan kadar gliserol dalam *film* pati naikkan orientasi interaksi-OH dan menghasilkan peningkatan moisture-sorption, meskipun dalam sistem *film*, bukan langsung pati kering.

Dalam konteks pati tapioka HMTg, peningkatan absorpsi air dapat dijelaskan pula oleh fakta bahwa perlakuan HMT (termasuk pemanasan gelombang mikro) cenderung mengubah struktur granula: mengurangi fragmen amorf, meningkatkan bagian kristalin, atau menghasilkan retikulum pati yang sedikit lebih terbuka, sehingga bersama gliserol menciptakan kondisi yang lebih menyerap (Guo *et al.*, 2019). Peningkatan daya serap air menunjukkan bahwa modifikasi HMT-MW dengan gliserol berhasil menciptakan sistem pati yang memudahkan mengikat air, yang dalam aplikasi pangan dapat meningkatkan kemampuan retensi kelembapan, kestabilan tekstur, dan fungsi hidrofob/hidrofil yang dapat dikontrol. Dari sisi praktis, nilai absorpsi air yang meningkat ini membuka potensi untuk aplikasi pada produk pangan yang membutuhkan retensi air tinggi (misalnya adonan basah, saus instan) atau bahan fungsional yang memerlukan interaksi dengan air, misalnya sebagai matriks pengantaran bahan aktif dalam sistem pangan atau sebagai *filler* pada bioplastik yang memerlukan keseimbangan antara hidrofilisitas dan stabilitas.

Namun demikian, penting untuk mempertimbangkan bahwa peningkatan daya serap air juga dapat membawa dampak kurang menguntungkan, misalnya mempercepat degradasi termal, mikroba, atau perubahan viskoelastik produk selama penyimpanan, sehingga desain formulasi perlu menyesuaikan dengan profil fungsi yang dibutuhkan. Kenaikan daya serap air pada HMTg sejalan dengan penurunan Tg matriks pati akibat plastikasi gliserol, yang meningkatkan relaksasi segmental dan menyediakan lebih banyak situs ikatan hidrogen untuk air. Selain itu, pengeringan pasca-MW berpotensi meninggalkan mikro-void yang memperbesar luas permukaan efektif dan jalur difusi, sehingga retensi air meningkat. Secara keseluruhan, daya serap air yang lebih tinggi relevan untuk sistem adonan/saus yang menuntut kelembapan stabil dan rasa di mulu yang lebih empuk, namun perlu dikompensasikan dengan kontrol aktivitas air untuk stabilitas mikrobiologis.

Daya Serap Minyak

Daya serap minyak mencerminkan kemampuan pati dalam menyerap dan menahan minyak dalam keadaan tanpa pemanasan lanjutan setelah kontak dengan minyak, yang relevan dalam aplikasi pangan (Nafi *et al.*, 2015). Dalam penelitian ini, nilai absorpsi minyak untuk pati tapioka yang dimodifikasi melalui metode HMT-MW dengan variasi gliserol (HMTg) berkisar antara 1,93 % hingga 2,13 %. Pati hasil perlakuan HMT tanpa gliserol menunjukkan nilai terendah yakni 1,93 %, sedangkan perlakuan HMTg15 (konsentrasi gliserol tertinggi) menghasilkan nilai tertinggi 2,13 %. Analisis statistik menunjukkan bahwa perlakuan memberikan pengaruh nyata ($p < 0,05$), meskipun uji Tukey menunjukkan bahwa perlakuan HMTg10 tidak berbeda nyata dengan sebagian perlakuan lainnya (Tabel 2).

Hasil peningkatan daya serap minyak seiring peningkatan kadar gliserol ini menunjuk pada dua kemungkinan mekanisme utama. Pertama, penambahan gliserol sebagai *plasticizer* pada granula pati dapat mengubah struktur internal granula, meningkatkan jarak antar rantai molekular dan memperluas area permukaan aktif untuk kontak dengan minyak. Hal ini konsisten dengan penelitian yang menyebut bahwa perubahan struktur mikrogranula akibat perlakuan termal atau fisik dapat meningkatkan afinitas terhadap minyak (Wang *et al.*, 2022). Kedua, meskipun pati pada umumnya bersifat hidrofilik, adanya penghancuran struktur kristalin dan peningkatan porositas mikro dapat memungkinkan minyak lebih mudah masuk ke dalam ruang bebas granula. Penjelasan ini sejalan dengan studi terkait daya serap minyak pati meningkat ketika struktur granula mengalami transformasi (Virág *et al.*, 2022).

Penting juga mencatat bahwa beberapa studi menyebut bahwa pembentukan kompleks pati-lemak dapat menurunkan kemampuan absorpsi minyak, karena lipid mampu menempel pada amilosa atau amilopektin dan menghambat penetrasi minyak lebih lanjut (Zhang *et al.*, 2022). Oleh karena itu, dalam konteks modifikasi dengan gliserol dan HMT, mekanisme terhadap peningkatan daya serap minyak kemungkinan dominan pada peningkatan permukaan dan porositas daripada pembentukan kompleks lipid yang membatasi.

Dari sisi aplikasi, nilai daya serap minyak yang meningkat menunjukkan bahwa pati termodifikasi ini memiliki potensi yang lebih baik untuk produk pangan yang menuntut retensi minyak, seperti bumbu kering, produk goreng, atau sistem adonan yang memerlukan penahanan lemak untuk tekstur dan rasa. Peningkatan daya serap minyak juga dapat menjadi nilai tambah dalam formulasi produk dengan profil lemak tinggi atau sebagai bahan pengisi dalam sistem pangan fungsional. Peningkatan daya serap minyak mengindikasikan terbentuknya porositas mikro dan/atau restrukturisasi permukaan yang memfasilitasi penetrasi fase non-polar. Pada kondisi ini, penyerapan fisik pada dinding pori berkontribusi pada retensi minyak. Walau sebagian pati dapat membentuk kompleks amilosa-lipid, pada HMTg efek dominan tampaknya adalah bertambahnya permukaan aktif, hal yang selaras dengan kenaikan daya serap air dan penurunan pengelembungan, yang menunjukkan struktur lebih rapat tetapi berpori.

Modifikasi HMT dengan penambahan gliserol pada pati tapioka secara positif memengaruhi daya serap minyak, dan bahwa peningkatan konsentrasi gliserol hingga 15% memberikan efek optimal dalam konteks penelitian ini. Namun, implikasi terhadap kestabilan produk dan interaksi minyak-pati selama pengolahan lebih lanjut perlu dieksplorasi dalam studi lanjutan.

Kemampuan Menggelembung Pati

Kemampuan menggelembung (*swelling power*) merupakan salah satu parameter penting yang menggambarkan kemampuan granula pati untuk menyerap air dan mengembang selama proses pemanasan. Fenomena ini sangat dipengaruhi oleh komposisi dan struktur internal pati, termasuk rasio amilosa terhadap amilopektin, panjang rantai polimer, dan distribusi berat molekul (Sasaki & Matsuki, 1998). Amilopektin yang memiliki struktur bercabang berperan besar dalam proses pengembangan granula, sedangkan amilosa cenderung membatasi pengembangan karena dapat membentuk ikatan hidrogen internal dan kompleks dengan lipid (Parwiyanti *et al.*, 2016).

Nilai kemampuan menggelembung pada penelitian ini berkisar antara 25,55–33,42 g/g, di mana perlakuan HMT tanpa gliserol menunjukkan nilai tertinggi (33,42 g/g), sedangkan perlakuan HMTg15 dengan konsentrasi gliserol tertinggi menunjukkan nilai terendah (25,55 g/g). Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi gliserol cenderung menurunkan kemampuan granula pati untuk mengembang (Tabel 2).

Penurunan kemampuan menggelembung akibat peningkatan konsentrasi gliserol disebabkan oleh terbentuknya kompleks antara molekul gliserol dengan amilosa melalui interaksi hidrogen pada inti heliks amilosa yang bersifat hidrofobik (Polnaya, 2020). Kompleks amilosa–gliserol ini memperkuat ikatan antarmolekul dan menghambat penetrasi air ke dalam granula, sehingga mengurangi kemampuan menggelembung dan kelarutan. Fenomena serupa juga dijelaskan oleh Wang *et al.* (2020), yang menyebutkan bahwa terbentuknya kompleks amilosa–lipid pada proses pemanasan turut menurunkan kemampuan menggelembung, karena amilosa yang berikatan tidak lagi berperan aktif dalam ekspansi granula. Pembatasan pengelembungan pada HMTg juga konsisten dengan kenaikan keteraturan lokal (pseudokristalinitas) dan menurunnya fraksi amorf yang mudah menyerap air. Kompleks inklusi amilosa–gliserol (analog dengan kompleks amilosa–lipid) menstabilkan heliks tunggal, sehingga air kesulitan mendisrupsi susunan tersebut saat pemanasan. Oleh sebab itu, kemampuan menggelembung turun bersamaan dengan kelarutan.

Selain itu, modifikasi HMT berperan dalam memperkuat ikatan hidrogen dan interaksi antarmolekul pada pati, yang meningkatkan stabilitas struktur kristalin. Namun, perlakuan termal ini juga dapat menyebabkan hilangnya sebagian ikatan heliks ganda dan mengurangi integritas daerah amorf granula, yang membatasi kemampuan granula untuk mengembang (Srichuwong *et al.*, 2005). Studi terkini oleh Chen *et al.* (2017) menunjukkan bahwa peningkatan gliserol selama proses pemanasan menyebabkan restrukturisasi kristalinitas pati dan menurunkan proporsi area amorf, yang secara langsung menurunkan kemampuan menggelembung.

Secara statistik, hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan HMT dengan variasi konsentrasi gliserol berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap nilai swelling power pati tapioka. Temuan ini menegaskan bahwa gliserol memiliki peran signifikan dalam mengatur keseimbangan antara kekompakan struktur dan kemampuan hidrasi granula pati.

Daya Larut Pati

Daya larut mencerminkan proporsi pati yang terpisah dari granula ke dalam larutan setelah perlakuan

suspensi–pemanasan maupun modifikasi, dan merupakan indikator penting terhadap struktur pati serta interaksinya dengan pelarut (Suriani, 2008). Dalam penelitian ini, nilai daya larut untuk pati tapioka hasil termodifikasi dengan metode HMT-MW dan variasi gliserol (HMTg) berkisar antara 7,02 % hingga 17,38 %. Pati hasil perlakuan HMT tanpa penambahan gliserol menunjukkan nilai tertinggi yaitu 17,38 %, sedangkan perlakuan dengan konsentrasi gliserol tertinggi (HMTg15) menghasilkan nilai terendah 7,02 %. Uji analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan berbeda nyata ($p < 0,05$) terhadap daya larut.

Pola bahwa semakin tinggi konsentrasi gliserol maka daya larut semakin menurun menunjukkan bahwa gliserol berperan dalam mengubah struktur pati dan menurunkan jumlah komponen yang terlarut. Penjelasan mekanistiknya meliputi: 1) pembentukan kompleks inklusi heliks antara gliserol dan amilosa di inti heliks amilosa yang bersifat hidrofobik. Kompleks ini menghambat penetrasi air dan pelarutan pati (Polnaya, 2020); 2) pengikatan aktif amilopektin dengan gugus hidroksil gliserol yang kemudian merangsang degradasi amilosa bebas atau mengurangi jumlah amilosa yang dapat dilepaskan, sehingga menurunkan nilai kelarutan (Olayinka *et al.*, 2008). Selain itu, modifikasi HMT meningkatkan ikatan antarmolekul pati (meningkatkan kristalinitas atau memperkuat struktur granular), yang secara umum mengurangi fragmen amorf yang mudah larut (Srichuwong *et al.*, 2005; Uzizerimana *et al.*, 2021).

Studi terkini mendukung temuan bahwa modifikasi termal atau perlakuan fisis pada pati mengarah ke penurunan kelarutan. Uzizerimana *et al.* (2021) melaporkan bahwa pada pati HMT, baik kemampuan menggelembung maupun daya larut pati mengalami penurunan secara signifikan. Hal ini konsisten dengan pengamatan penelitian ini terhadap pati tapioka HMTg. Penelitian oleh Tarique *et al.* (2021) menunjukkan bahwa dalam *film* pati-gliserol, peningkatan gliserol mengubah interaksi rantai polimer sehingga mengurangi mobilitas air dan menurunkan solubilitas, walaupun konteksnya *film* bukan pati kering langsung, namun mekanisme yang sama dapat dijadikan analogi.

Secara fungsional, penurunan daya larut menunjukkan bahwa pati termodifikasi ini menjadi lebih stabil terhadap pelarutan, yang bisa menguntungkan untuk aplikasi dalam produk pangan atau bahan non-pangan yang membutuhkan kestabilan struktur, misalnya bahan pengental suhu tinggi, bahan pengisi (*filler*) dalam bioplastik, atau matriks bahan aktif yang tidak mudah larut selama penyimpanan. Namun, di sisi lain, kelarutan yang terlalu rendah bisa mengurangi reaktivitas pati dalam formulasi yang memerlukan hidrasi cepat atau pelarutan, hal ini perlu dipertimbangkan dalam desain produk.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan gliserol dalam proses HMT-MW pada pati tapioka secara signifikan menurunkan daya larut, dan bahwa konsentrasi gliserol 15% menghasilkan efek terendah dalam hal kelarutan. Temuan tersebut memberikan kontribusi pada pemahaman bagaimana modifikasi pati dapat diatur untuk mencapai profil fungsional yang diinginkan, khususnya dalam konteks kestabilan terhadap pelarutan. Penurunan kelarutan pada HMTg menandakan berkurangnya pelepasan rantai pendek (terutama amilosa terlarut) dari granula. Ikatan hidrogen kompetitif gliserol–pati membentuk jaringan yang lebih koheren, sehingga difusi fragmen keluar granula selama pemanasan berkurang. Bersama peningkatan keteraturan domain, hal ini menghasilkan kelarutan yang lebih rendah namun stabilitas panas lebih baik.

Densitas Kamba

Densitas kamba merupakan parameter fisik yang menggambarkan jumlah massa bahan per satuan volume, termasuk ruang antarpartikel. Nilai ini mencerminkan tingkat kerapatan, porositas, serta sifat pengemasan dari bahan tepung. Densitas kamba yang tinggi menunjukkan struktur partikel yang padat dan sedikit ruang antarpartikel, sedangkan nilai yang rendah menunjukkan bahan yang lebih berpori dan ringan (Khalil, 1999).

Pada penelitian ini, densitas kamba pati tapioka hasil modifikasi HMT-MW dengan variasi konsentrasi gliserol (HMTg) berkisar antara 4,58–6,25 g/mL. Perlakuan HMTg5 menghasilkan nilai tertinggi (6,25 g/mL), sedangkan perlakuan HMTg15 menunjukkan nilai terendah (4,58 g/mL). Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa penambahan gliserol berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap densitas Kamba (Tabel 2).

Peningkatan densitas kamba pada penambahan gliserol hingga 5 % diduga terkait dengan terbentuknya interaksi antara gugus hidroksil gliserol dan gugus hidroksil pada molekul pati yang menyebabkan agregasi dan pemadatan partikel selama proses pemanasan. Gliserol berperan sebagai *plasticizer* yang memfasilitasi mobilitas molekul dan memungkinkan reorientasi rantai amilosa serta amilopektin, sehingga menghasilkan struktur partikel yang lebih kompak (Tarique *et al.*, 2021). Namun, pada konsentrasi gliserol yang lebih tinggi (10–15 %), interaksi hidrogen antar molekul meningkat secara berlebihan, menyebabkan terperangkapnya molekul air selama proses HMT. Ketika air tersebut menguap selama pengeringan,

terbentuk rongga atau pori-pori di dalam matriks pati, yang pada akhirnya menurunkan densitas kamba (Kim & Huber, 2013).

Bahan dengan struktur berpori cenderung memiliki densitas rendah karena peningkatan volume ruang antarpartikel. Cozar *et al.* (2017) menemukan bahwa modifikasi termal pati dengan *plasticizer* gliserol dapat menyebabkan relaksasi rantai polimer amiloda/amilopektin dan pelepasan air selama pendinginan. Dengan demikian, perubahan nilai densitas kamba pada pati tapioka HMTg menunjukkan adanya keseimbangan antara efek pemadatan awal akibat gliserol dan pembentukan porositas pada konsentrasi gliserol tinggi.

Secara fungsional, densitas kamba berpengaruh terhadap karakteristik fisik bahan dalam proses industri pangan, seperti kemampuan alir, efisiensi pengemasan, dan kestabilan produk selama penyimpanan. Nilai densitas kamba yang lebih rendah pada perlakuan HMTg10 dan HMTg15 menunjukkan bahwa pati termodifikasi memiliki struktur lebih berpori, yang dapat meningkatkan kemampuan penyerapan cairan dan menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi sebagai bahan pengisi, pengental, atau *carrier agent* dalam formulasi pangan fungsional maupun bahan biopolimer. Profil densitas kamba yang memuncak pada 5% kemudian turun pada 10–15% menunjukkan adanya *trade-off*: dosis gliserol moderat memfasilitasi pemadatan/agregasi partikel saat pengeringan, tetapi pada dosis tinggi pembentukan mikro-void dan aglomerat longgar mendominasi, menurunkan kerapatan semu. Implikasi proses: pilihan kadar gliserol perlu diseimbangkan dengan target *flowability* dan efisiensi pengemasan.

Derajat Putih

Derajat putih (*whiteness degree*) merupakan salah satu parameter fisik penting yang berperan dalam menentukan kualitas visual dan persepsi mutu produk tepung. Dalam konteks industri pangan, tingkat keputihan sering kali menjadi indikator pertama yang diamati konsumen untuk menilai kemurnian dan kesegaran bahan, khususnya pada produk berbasis pati (Sinaga *et al.*, 2019). Nilai derajat keputihan mencerminkan kemampuan permukaan partikel pati dalam memantulkan cahaya tampak, yang kemudian dibandingkan terhadap standar putih tertentu.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa derajat putih pati tapioka hasil modifikasi HMT-MW dengan variasi konsentrasi gliserol (HMTg) berkisar antara 3,53–4,20 %. Perlakuan HMTg5 menghasilkan nilai tertinggi (4,20 %), sedangkan HMTg15 menunjukkan nilai terendah (3,53 %). Analisis ragam memperlihatkan bahwa perbedaan konsentrasi gliserol memberikan pengaruh nyata terhadap nilai derajat keputihan ($p < 0,05$). Penambahan gliserol sebesar 5 % merupakan titik optimum yang menghasilkan warna paling cerah, sedangkan peningkatan konsentrasi di atas level tersebut menurunkan derajat keputihan.

Penurunan tingkat keputihan pada konsentrasi gliserol tinggi dapat dikaitkan dengan meningkatnya intensitas pemanasan dan lama waktu perlakuan selama proses HMT. Pemanasan yang lebih lama mempercepat reaksi pencokelatan non-enzimatis (*Maillard reaction*) antara gugus karbonil (hasil degradasi karbohidrat) dan gugus amina bebas dari protein atau senyawa nitrogen lainnya (Shimamura & Ukeda, 2012). Reaksi ini menghasilkan senyawa melanoidin berwarna cokelat yang menurunkan reflektansi cahaya.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan HMT-MW dengan penambahan gliserol 5 % menghasilkan tingkat putih optimum, menandakan interaksi gliserol-pati pada konsentrasi ini belum menyebabkan degradasi termal signifikan. Namun, pada konsentrasi lebih tinggi, kelebihan gliserol dapat meningkatkan konduktivitas panas lokal dan mempercepat proses pencokelatan, sehingga nilai derajat keputihan menurun. Temuan ini selaras dengan laporan Pajak *et al.* (2013), yang mengemukakan bahwa peningkatan kadar *plasticizer* (seperti gliserol) dalam sistem pati dapat menurunkan nilai L^* (kecerahan) dalam pengukuran warna. Penurunan keputihan pada HMTg tinggi kemungkinan dipicu oleh akumulasi energi MW lokal pada situs kaya gliserol/air, yang mempercepat jalur pencokelatan non-enzimatis (Maillard/karamelisasi). Di sisi lain, jejak pigmen/pengotor anorganik dari bahan baku akan memperkuat penurunan reflektansi. Pengendalian suhu efektif, siklus *microwave*, dan praproses bahan baku (penyaringan, *washing*) dapat meminimalkan degradasi warna.

Dari sisi aplikatif, nilai derajat putih yang relatif tinggi menunjukkan potensi penggunaan pati termodifikasi ini sebagai bahan dasar pada produk pangan yang menuntut tampilan cerah, seperti mie instan, roti, biskuit, dan *snack coating*. Sebaliknya, untuk aplikasi non-pangan seperti bioplastik atau perekat alami, penurunan derajat keputihan tidak selalu menjadi kelemahan, karena warna kecokelatan justru dapat menunjukkan peningkatan kestabilan termal akibat reaksi Maillard parsial.

KESIMPULAN

Modifikasi pati tapioka dengan metode *heat-moisture treatment* berbasis gelombang mikro (HMT-MW) dan penambahan gliserol berpengaruh nyata terhadap sifat fisikokimia pati. Peningkatan konsentrasi gliserol menurunkan kadar abu, *swelling power*, daya larut, densitas kamba, dan derajat keputihan, namun meningkatkan daya serap air dan minyak. Perubahan ini menunjukkan bahwa gliserol berperan sebagai *plasticizer* yang memodifikasi struktur dan interaksi antarmolekul pati. Perlakuan dengan konsentrasi gliserol 5% menghasilkan karakteristik paling stabil dan optimal, menjadikannya potensial untuk diaplikasikan dalam produk pangan dan bahan biopolimer berbasis pati.

DAFTAR PUSTAKA

- Adebowale, K.O., Henle, T., Schwarzenbolz, U., & Doert, T. (2009). Modification and properties of African yam bean (*Sphenostylis stenocarpa* Hochst. ex A. Rich.) Harms starch I: Heat moisture treatments and annealing. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1947–1957. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.01.002>
- Ajiya, D.A., Jikan, S.S., Talip, B.H., Badarulzaman, N.A., Matias-PeraltaH., M., Derawi, D., & Yahaya, S. (2017). The influence of glycerol on mechanical, thermal and morphological properties of thermoplastic tapioca starch film. *Journal of Science and Technology*, 9.
- Akpa, J.G. & Dagde, K.K. (2012). Modification of cassava starch for industrial uses. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(6), 913–919.
- AOAC International. (2012). *Official methods of analysis of the Association of Analytical Chemists* (19th ed.). AOAC International.
- Amaraweera, S.M., Gunathilake, C., Gunawardene, O.H.P., Fernando, N.M.L., Wanninayaka, D.B., Dassanayake, R.S., Rajapaksha, S.M., Manamperi, A., Fernando, C.A.N., Kulatunga, A.K., & Manipura, A. (2021). Development of starch-based materials using current modification techniques and their applications: A review. *Molecules*, 26, 6880. <https://doi.org/10.3390/molecules26226880>
- Ayele, E., Urga, K., & Chandravanshi, B. S. (2015) Effect of cooking temperature on mineral content and anti-nutritional factors of yam and taro grown in Southern Ethiopia. *International Journal of Food Engineering*, 11(3), 371-382. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0264>
- Basiak, E., Lenart, A., & Debeaufort, F. (2018). How glycerol and water contents affect the structural and functional properties of starch-based edible films. *Polymers*, 10(4), 412. <https://doi.org/10.3390/polym10040412>
- Chen, X., Guo, L., Du, X., Chen, P., Ji, Y., Hao, H., & Xu, X. (2017). Investigation of glycerol concentration on corn starch morphologies and gelatinization behaviours during heat treatment. *Carbohydrate Polymers*, 176, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.08.062>
- Cozar, O., Cioica, N., Coța, C., Nagy, E., & Fechete, R. (2017). Plasticizers effect on native biodegradable package materials. *AIP Conference Proceedings*, 1796, 040008 (2017) <https://doi.org/10.1063/1.4972386>
- Drouzas, A.E., Tsami, E., & Saravacos, G.D. (1999). Microwave/vacuum drying of model fruit gels. *Journal of Food Engineering*, 39(2), 117–122. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00133-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00133-2)
- Gunaratne, A., & Hoover, R. (2002). Effect of heat–moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. *Carbohydrate Polymers*, 49(4), 425–437. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(01\)00354-X](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(01)00354-X)
- Guo, Y., Xu, T., Li, N., Cheng, Q., Qiao, D., Zhang, B., Zhao, S.-m., Huang, Q., & Lin, Q. (2019). Supramolecular structure and pasting/digestion behaviors of rice starches following concurrent microwave and heat moisture treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 437-444. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.189>
- Hartanto, D. (2012). *Kimia Pangan*. Yogyakarta: Deepublish.
- Juansang, J., Pancha-Arnon, S., Uttapap, D., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., & Watcharatewinkul, Y. (2016). Concentration of plasticizers applied during heat–moisture treatment affects properties of modified canna starch. *Food Chemistry*, 221, 1587–1594. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.134>
- Khalil. (1999). Pengaruh kandungan air dan ukuran partikel terhadap perubahan perilaku fisik bahan pakan lokal: Kerapatan tumpukan, kerapatan pemadatan dan bobot jenis. *Media Peternakan*, 22(1), 1-11.
- Kim, C., & Huber, K. C. (2013). Corn starch granules with enhanced load-carrying capacity via citric acid treatment. *Carbohydrate Polymers*, 91(1), 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.07.049>

- Kusnandar, F. (2010). *Teknologi Modifikasi Pati dan Aplikasinya di Industri Pangan*. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Lazou, A., & Krokida, M. (2010). Functional properties of corn and corn–lentil extrudates. *Food Research International*, 43(2), 609–616. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.017>
- Li, J., & Yeh, A. I. (2014). Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. *Journal of Food Engineering*, 50(3), 141–148. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00236-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00236-3)
- Nafi, A., Diniyah, N., & Hastuti, F. T. (2015). Karakteristik fisikokimia dan fungsional teknis tepung koro kratok (*Phaseolus lunatus* L.) termodifikasi yang diproduksi secara fermentasi spontan. *Jurnal Agrointek*, 9(1), 24–32.
- Olayinka, O. O., Adebawale, K. O., & Olu-Owolabi, B. I. (2008). Effect of heat–moisture treatment on physicochemical properties of white sorghum starch. *Food Hydrocolloids*, 22(2), 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.11.004>
- Pajak, P., Madej, M., & Krystijan, M. (2013). Edible coatings as an alternative to synthetic films. *Potravinarstvo*, 7(Special Issue), 200–203.
- Parwiyanti, P., Pratama, F., Wijaya, A., Malahayati, N., & Lidiasari, E. (2016). Sifat fisik pati ganyong (*Canna edulis* Kerr.) termodifikasi dan penambahan gum xanthan untuk rerotian. *Agritech*, 36(3), 335–343. <https://doi.org/10.22146/agritech.16606>
- Picauly, P., Damamain, E., & Polnaya, F. J. (2017). Karakteristik fisiko-kimia dan fungsional pati sagu ihur termodifikasi dengan heat moisture treatment. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 28(1), 70–77. <https://doi.org/10.6066/jtip.2017.28.1.70>
- Polnaya, F.J. (2020). Amylose Inclusion Complexes. In: Amylose: Properties, Structure and Functions. Himjyoti Dutta, Sanjib Kr. Paul (Editors). Nova Science Publishers, New York.
- Sasaki, T., & Matsuki, J. (1998). Effect of wheat starch structure on swelling power. *Cereal Chemistry*, 75(4), 525–529. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.4.525>
- Shimamura, T. & Ukeda, H. (2012). Maillard reaction in milk - effect of heat treatment. In: Hurley, W.L. (Ed.). Milk Protein. InTech Open. <http://dx.doi.org/10.5772/50079>
- Srichuwong, S. (2005). Starches from different botanical sources II: Contribution of starch structure to swelling and pasting properties. *Carbohydrate Polymers*, 62(1), 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.07.003>
- Sulistyoningsih, M., Rakhmawati, R., & Setyaningrum, A. (2019). Kandungan karbohidrat dan kadar abu pada berbagai olahan lele mutiara (*Clarias gariepinus* B). *Jurnal Ilmiah Teknosains*, 5(1), 41–46.
- Suriani, A. I. (2008). *Mempelajari Pengaruh Pemanasan Dan Pendinginan Berulang Terhadap Karakteristik Sifat Fisik Dan Fungsional Pati Garut (Marantha arundinacea) termodifikasi* [Skripsi, Institut Pertanian Bogor].
- Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers. *Scientific Reports*, 11, 13900. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93094-y>
- Thy, P., Yu, C., Jenkins, B. M., & Leshner, C. E. (2013). Inorganic composition and environmental impact of biomass feedstock. *Energy Fuels*, 27, 3969–3987. <https://doi.org/10.1021/ef400660u>
- Uzizerimana, F., Dang, K., Yang, Q., Hossain, Md. S., Gao, S., Bahati, P., Mugiraneza, N. G., Yang, P., & Feng, B. (2021). Physicochemical properties and in vitro digestibility of tartary buckwheat starch modified by heat moisture treatment: A comparative study. *NFS Journal*, 25, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2021.09.001>
- Virág, L., Bocsi, R., & Pethő, D. (2022). Adsorption properties of essential oils on polylactic acid microparticles of different sizes. *Materials*, 15, 6602. <https://doi.org/10.3390/ma15196602>
- Wang, Y., McClements, D. J., Long, J., Qiu, C., Sang, S., Chen, L., Xu, Z., & Jin, Z. (2022). Structural transformation and oil absorption of starches with different crystal types during frying. *Food Chemistry*, 390, 133115. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133115>
- Wang, S., Chao, C., Cai, J., Niu, B., Copeland, L., & Wang, S. (2020). Starch–lipid and starch–lipid–protein complexes: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(3), 1–24. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12550>
- Zhang, S., Li, Q., Zhao, Y., Qin, Z., Zheng, M., Liu, H., & Liu, J. (2022). Preparation and characterization of low oil absorption corn starch by ultrasonic combined with freeze–thaw treatment. *Food Chemistry: X*, 15, 100410. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100410>