



Modifikasi Fisik Sumber Pati Melalui *Microwave Heat Treatment*: Tinjauan Parameter Daya dan Waktu Terhadap *Swelling Power* dan *Solubility* Pati

Anisa Aulia Rahma^{1*}, Dara Fazila Antugia², Christofer Lano Marus³, Chantikha Dhevianna Mulia⁴

¹⁻⁴ Universitas Tanjungpura, Indonesia

Alamat: Jl. Profesor Dokter H. Hadari Nawawi, Bansir Laut, Kec. Pontianak Tenggara, Kota Pontianak, Kalimantan Barat

Korespondensi penulis: c1061221001@student.untan.ac.id*

Abstract. *physical modification of starch using microwave heat treatment (MHT) technology serves as an efficient and environmentally friendly alternative to enhance the functional properties of starch without chemical additives. This article aims to examine the influence of microwave power and heating duration on the swelling power and solubility of various starch types, including tapioca, taro, sago, and lotus rhizome. A review of four studies revealed that power and time parameters significantly affect the crystalline structure of starch granules, resulting in either enhancement or reduction of their functional properties. High power or prolonged heating may decrease swelling power due to crystal restructuring and granule disruption, while solubility increases as a result of amylose and amylopectin degradation. MHT has proven to accelerate the heating process in a volumetric and efficient manner, improving water absorption capacity and viscosity. Despite its drawback of uneven heat distribution, this method remains relevant as a physical modification technique aligned with green processing principles in the food industry.*

Keywords: *Microwave Heat Treatment (MHT), Starch Modification, Swelling Power, Solubility.*

Abstrak. Modifikasi fisik pati dengan teknologi *microwave heat treatment (MHT)* menjadi alternatif yang efisien dan ramah lingkungan untuk meningkatkan sifat fungsional pati tanpa penggunaan bahan kimia. Artikel ini bertujuan mengkaji pengaruh daya dan durasi pemanasan microwave terhadap daya kembang (*swelling power*) dan kelarutan (*solubility*) berbagai jenis pati seperti tapioka, talas, sago, dan rimpang teratai. Berdasarkan hasil kajian terhadap empat penelitian, ditemukan bahwa parameter daya dan waktu sangat mempengaruhi struktur kristalin granula pati, yang berdampak pada peningkatan atau penurunan sifat fungsional tersebut. Daya tinggi atau waktu lama dapat menurunkan daya kembang akibat restrukturisasi kristal dan disrupsi granula, sementara kelarutan meningkat karena degradasi amilosa dan amilopektin. MHT terbukti mempercepat proses pemanasan secara volumetrik dan efisien, serta mampu meningkatkan kapasitas penyerapan air dan viskositas. Meskipun memiliki kelemahan seperti distribusi panas tidak merata, metode ini tetap relevan sebagai teknik modifikasi fisik yang mendukung prinsip *green processing* dalam industri pangan.

Kata kunci: Microwave Heat Treatment (MHT), Modifikasi Pati, Daya Kembang, Kelarutan

1. LATAR BELAKANG

Pati adalah biopolimer semi-kristalin, dan merupakan salah satu karbohidrat yang paling melimpah di alam. Pati merupakan karbohidrat cadangan utama di banyak tanaman. Pati tersebar luas di antara tumbuhan, termasuk biji, akar, umbi umbian, dan sereal (Nand et al., 2008; Deka & Sit, 2016). Pati asli memiliki penggunaan yang terbatas dalam pengolahan makanan karena memiliki rentang viskositas puncak yang sempit, toleransi proses yang buruk, kurangnya kejernihan, membentuk pasta yang lemah, kohesif dan kenyal ketika dipanaskan, dan gel yang tidak diinginkan saat didinginkan atau selama penyimpanan karena retrogradasi dan presipitasi (Abbas et al., 2010; Sharma et al., 2015). Sifat fungsional pati asli dapat ditingkatkan dengan modifikasi melalui metode fisik, kimia atau enzimatik.

Modifikasi pati melibatkan tiga teknik pengolahan utama yaitu pengolahan fisik, kimia, atau enzimatik. Pengolahan modifikasi kimia dan enzimatik telah menunjukkan peningkatan yang menjanjikan dalam fungsionalitas dan manfaat pati seperti sifat pengemulsi yang lebih baik dan kandungan pati resisten yang lebih tinggi (Matos et al., 2016; Polnaya et al., 2018; Shukri et al., 2015). Namun, terdapat kekhawatiran tentang penggunaan bahan kimia dalam produk pangan Pati yang dimodifikasi secara kimia perlu menjalani berbagai penilaian oleh badan otorisasi tentang keamanan pati yang dimodifikasi. Modifikasi enzimatik memiliki keterbatasan, seperti kebutuhan ruang fermentasi, ketidakstabilan pada suhu tinggi, dan biaya tinggi. Oleh karena itu, modifikasi fisik menjadi alternatif yang lebih baik karena lebih aman, efisien waktu, dan berpotensi lebih ekonomis (Zailani *et al.*, 2022).

Perlakuan panas berbasis gelombang mikro (microwave heat treatment) merupakan salah satu metode modifikasi fisik yang efisien, karena mampu mempercepat proses pemanasan pati dibandingkan dengan metode konvensional. Teknologi ini memanfaatkan radiasi gelombang mikro yang menembus matriks pati dan menghasilkan panas melalui getaran molekul akibat gesekan (Wang et al., 2019). Perlakuan ini tidak hanya menyebabkan perubahan pada morfologi granula dan struktur kristal pati, tetapi juga dapat memutus rantai dekstran panjang yang terdapat dalam molekul pati (Xie et al., 2013; Zailani *et al.*, 2022). Penggunaan gelombang mikro terbukti mampu meningkatkan sifat fisikokimia pati asli secara signifikan (Oyeyinka et al., 2019).

Perlakuan gelombang mikro terbukti mampu meningkatkan daya mengembang (*swelling power*) dan kelarutan (*solubility*) pati, dengan efek yang sangat bergantung pada variasi intensitas daya dan durasi pemanasan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa microwave heat treatment (MHT) memiliki potensi tinggi sebagai metode modifikasi fisik yang efisien dalam meningkatkan karakteristik fungsional pati dari berbagai sumber nabati (Deka & Sit 2016). Artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis pengaruh parameter daya dan waktu pada perlakuan gelombang mikro terhadap sifat swelling power dan solubility berbagai jenis pati. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam memahami efektivitas MHT sebagai pendekatan teknologi yang prospektif dalam pengembangan bahan pangan fungsional.

2. METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan metode *literature review* berupa *narrative review*. Pencarian sumber literatur menggunakan database jurnal teknologi pangan yaitu: *Science Direct* dan *Google Scholar*. Kriteria artikel menggunakan bahasa Inggris dan bahasa Indonesia yang

dipublikasikan pada tahun 2015–2025. Kata kunci yang digunakan yakni *starch*, *starch modified*, *modification of starch*, *microwave treatment*, *microwave heating*, dan *starch microwave*. Proses analisis dari identifikasi judul dan abstrak, isi hasil penelitian, dan ekstraksi data. Berdasarkan proses seleksi tersebut, artikel yang terpilih sebanyak 4 artikel. Keempat artikel tersebut membahas penggunaan *microwave heat treatment* pada modifikasi pati.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode *Microwave Heat Treatment*

Microwave heat treatment merupakan salah satu bentuk modifikasi fisik terhadap pati yang memiliki banyak keunggulan seperti efisiensi energi, waktu pemrosesan yang singkat, biaya yang lebih rendah karena energi terkonsentrasi pada bahan yang akan ditingkatkan serta lebih ramah lingkungan. Teknologi ini memanfaatkan gelombang elektromagnetik non-ionisasi dalam rentang frekuensi gelombang mikro, yaitu antara 300 MHz hingga 300.000 MHz (atau 300 GHz), sebagai sumber pemanas. Berbeda dengan pemanasan konvensional yang memindahkan panas dari permukaan ke inti bahan, pemanasan menggunakan gelombang mikro bersifat volumetrik karena energinya menembus langsung ke dalam matriks pati dan menghasilkan panas secara internal (Sangadji *et al.*, 2024).

Mekanisme pemanasan ini dikenal sebagai *dielectric heating*, yakni proses konversi energi elektromagnetik menjadi energi panas melalui osilasi molekul-molekul polar seperti air dan gugus hidroksil dalam granula pati. Osilasi ini menyebabkan terjadinya gesekan antar molekul yang menghasilkan panas secara langsung di dalam bahan. Pemanasan gelombang mikro dikategorikan sebagai fenomena medan multifisika karena melibatkan interaksi antara medan listrik frekuensi tinggi dengan molekul-molekul dalam bahan (Wang *et al.*, 2019). Keunggulan lain dari metode ini mencakup kecepatan pemrosesan, penetrasi panas yang lebih dalam, dan efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan metode termal tradisional.

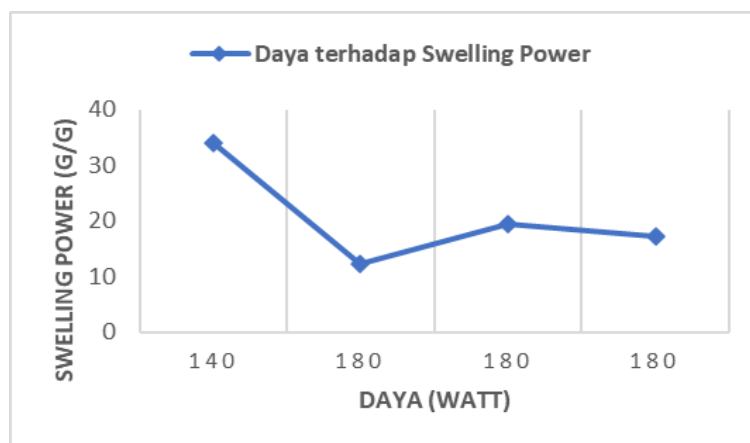
Frekuensi microwave yang paling umum digunakan dalam aplikasi pangan adalah 2450 MHz karena terbukti efektif dalam memanaskan bahan pangan yang bersifat polar. Bahan seperti air dan pati mampu menyerap energi gelombang mikro dengan baik dan merespons terhadap perubahan arah medan listrik secara cepat. Pada beberapa penelitian, MHT juga digunakan dalam teknik modifikasi ganda, seperti kombinasi dengan iradiasi gamma, autoklaf, atau oven panas, untuk mengevaluasi efek sinergisnya terhadap struktur molekul pati serta peningkatan sifat fungsional seperti kelarutan, daya serap air, dan kandungan pati resisten (Chandak *et al.*, 2022).

Tabel 1. Penelitian mengenai modifikasi pati menggunakan metode *Microwave Heat Treatment*

Jenis Pati	Daya (Watt)	Waktu (Menit)	Swelling (g/g)	Solubility (%)	Referensi
Talas	180	5	12.32	11.73	Deka & Sit, (2016)
Tapioka	140	30	34.07	25.95	Sangadji <i>et al.</i> , (2024)
Pati Rimpang Teratai	180	3	19.50	12.51	Chandak <i>et al.</i> , (2022)
Sagu	180	15	17.08	11.40	Zailani <i>et al.</i> , (2022)

Pengaruh Daya pada Modifikasi Pati dengan *Microwave Heat Treatment* terhadap *Swelling Power*

Berdasarkan data pada Tabel 1, terlihat bahwa variasi daya *microwave* selama proses *heat treatment* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap daya bengkak (*swelling power*) dari pati yang dimodifikasi. Perlakuan dengan daya *microwave* sebesar 140 W menunjukkan daya bengkak tertinggi, yakni sebesar 34.07 g/g. Hasil ini menunjukkan bahwa pada daya rendah, proses energi *microwave* masuk ke dalam butiran pati terjadi lebih merata dan perlahan. Hal ini mengakibatkan gangguan sebagian pada struktur kristalin dan amorf dengan cara yang seimbang, tanpa merusak keutuhan butiran secara berlebihan. Sebaliknya, perlakuan dengan daya *microwave* yang lebih tinggi, yaitu 180 W, justru menghasilkan nilai daya bengkak yang lebih rendah, yakni masing-masing 12.32 g/g, 19.50 g/g, dan 17.08 g/g pada durasi perlakuan yang berbeda seperti yang dapat dilihat pada gambar 1. Terjadi penurunan hasil daya bengkak pada pati seiring dengan bertambahnya daya pada proses *microwave heat treatment*. Penurunan ini menunjukkan bahwa peningkatan daya *microwave* secara signifikan dapat menyebabkan degradasi molekul amilosa atau terjadinya gelatinisasi parsial yang tidak seragam, sehingga kapasitas granula dalam menyerap air menurun (Danimayostu, 2017; Faisal *et al.*, 2023). Hasil tersebut menunjukkan bahwa intensitas daya *microwave* juga memainkan peranan penting dalam menentukan perubahan struktur granula pati dan karakteristik fungsionalnya.



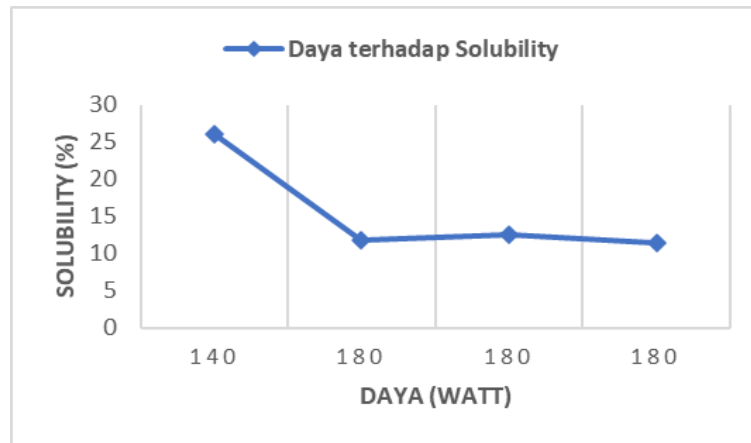
Gambar 1. Grafik hasil *swelling power* berdasarkan perbedaan daya

Penurunan nilai daya pembengkakan pada daya tinggi ini juga kemungkinan besar disebabkan oleh pemanasan berlebih di dalam butiran yang mengakibatkan kerusakan pada struktur molekul di dalamnya dengan cepat sebelum air dapat terserap dengan baik. Ini menunjukkan bahwa daya *microwave* yang terlalu tinggi mengakibatkan perlakuan panas yang terlalu keras, sehingga menyebabkan perubahan dan pelunakan yang tidak diinginkan pada jaringan pati. Pengaruh daya dalam proses *microwave heat treatment* ini sejalan dengan prinsip reaksi pemanasan berbasis gelombang elektromagnetik, dimana distribusi energi dan densitas daya memengaruhi kemampuan molekul air untuk memutus ikatan hidrogen intra dan antar rantai amilosa serta amilopektin (Amalia & Kumoro, 2015). Maka dari itu, perlakuan pada daya rendah namun dengan waktu yang cukup misalnya 30 menit pada daya 140 W memungkinkan terjadinya difusi air dan relaksasi struktur pati yang lebih efektif dibandingkan pemanasan cepat dengan daya tinggi.

Pengaruh Daya pada Modifikasi Pati dengan *Microwave Heat Treatment* terhadap Solubility

Grafik dibawah menunjukkan hubungan antara daya (Watt) dengan tingkat kelarutan (solubility) suatu bahan yang dinyatakan dalam persen (%). Dari grafik tersebut terlihat bahwa pada daya 140 watt, kelarutan mencapai nilai tertinggi yaitu 25.95%. Namun, ketika daya ditingkatkan menjadi 180 watt, kelarutan mengalami penurunan drastis dengan nilai paling rendah menjadi 11.40% dan cenderung tetap stabil pada nilai tersebut meskipun pengukuran dilakukan beberapa kali pada daya yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan daya dari 140 watt ke 180 watt menyebabkan penurunan signifikan pada kelarutan bahan. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh pengaruh suhu yang dihasilkan dari daya yang lebih tinggi,

yang dapat merusak struktur bahan, seperti menyebabkan penggumpalan partikel, sehingga bahan menjadi lebih sulit larut. Dengan demikian, daya pemrosesan yang lebih rendah (140 watt) cenderung lebih efektif dalam mempertahankan kelarutan bahan dibandingkan daya yang lebih tinggi.



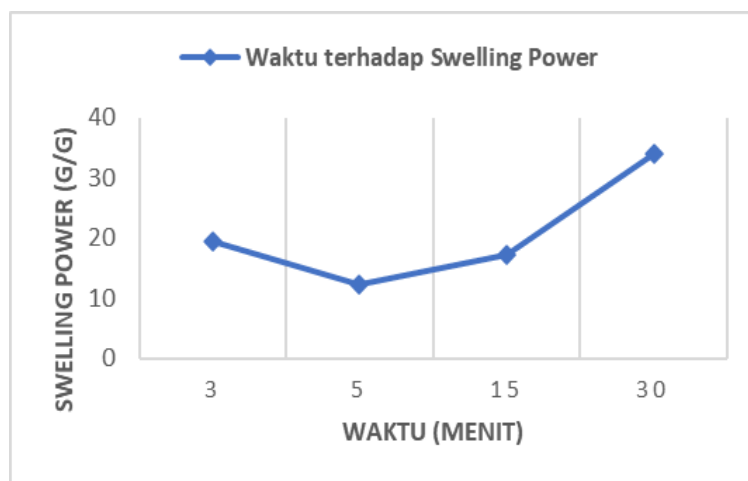
Gambar 2. Grafik hasil *solubility* berdasarkan perbedaan daya

Perlakuan microwave dengan daya tinggi dan waktu pemanasan yang diperpanjang dapat menyebabkan penurunan kristalinitas pati dan peningkatan bentuk amorf. Perubahan ini meningkatkan kelarutan pati karena struktur yang lebih amorf lebih mudah larut dalam air dibandingkan struktur kristalin (Cai *et al.*, 2024). Tetapi jika terjadi peningkatan daya microwave yang berlebihan, ini juga dapat menyebabkan degradasi struktur pati, seperti penggumpalan granula pati menjadi gumpalan besar, yang justru dapat menurunkan kelarutan. Peningkatan suhu dan waktu pemanasan menyebabkan peningkatan kelarutan dan daya kembang, seiring dengan pecahnya struktur kristalin pati akibat gelatinisasi pada pati tapioka (Haryanti *et al.*, 2014). Perlakuan microwave juga menyebabkan degradasi granula dan transisi struktur kristalin menjadi amorf, sehingga kelarutan meningkat. Namun, kelarutan akan menurun jika daya terlalu tinggi karena pembentukan aglomerat yang tidak larut (Zailani *et al.*, 2022). Pada pati rimpang teratai, perlakuan panas menyebabkan penurunan kristalinitas dan peningkatan fase amorf, yang meningkatkan interaksi pati dengan air sehingga kelarutan meningkat secara signifikan (Wei *et al.*, 2020). Jika pada pati talas, microwave-retrogradasi dapat memodifikasi struktur granular menjadi lebih terbuka, sehingga meningkatkan kemampuan larut pati, meskipun data spesifik terkait daya masih terbatas (Wang *et al.*, 2019). Peningkatan daya microwave dalam modifikasi pati dapat meningkatkan kelarutan hingga titik tertentu dengan mengubah struktur kristalin menjadi amorf dan meningkatkan kadar amilosa serta amilopektin. Namun, daya yang terlalu tinggi dapat merusak struktur pati dan

menurunkan kelarutan, sehingga diperlukan optimasi kondisi pemrosesan untuk mencapai hasil yang diinginkan. Oleh karena itu, pemilihan daya microwave yang optimal sangat penting untuk mencapai peningkatan kelarutan tanpa merusak struktur pati secara berlebihan.

Pengaruh Waktu pada Modifikasi Pati dengan *Microwave Heat Treatment* terhadap *Swelling Power*

Dari tabel 1, dapat dilihat terdapat perbedaan penggunaan lama waktu dalam proses modifikasi pati dengan *microwave heat treatment* sehingga menghasilkan *swelling power* atau daya bengkak yang berbeda dari masing-masing jenis pati. Pada tabel 1 tersebut menunjukkan durasi metode *microwave heat treatment* tertinggi yaitu 30 menit pada tapioka yang menghasilkan daya bengkak tertinggi yaitu sebesar 34.07 g/g. Hal ini menunjukkan bahwa durasi perlakuan yang semakin tinggi memainkan peran yang signifikan dalam merubah karakteristik fisikokimia dari granula pati seperti meningkatkan *swelling power* pada pati ditandai dengan meningkatnya nilai *swelling* pada hasil. Hasil ini menunjukkan adanya kecenderungan bahwa semakin lama waktu perlakuan *microwave*, maka semakin besar daya bengkak yang dihasilkan. Peningkatan ini terjadi karena energi dari gelombang mikro mampu memutus ikatan hidrogen antar molekul amilosa dan amilopektin, serta menyebabkan disintegrasi parsial granula pati, yang pada akhirnya meningkatkan kapasitasnya dalam menyerap air (Parwiyanti *et al.*, 2016).



Gambar 3. Grafik hasil *swelling power* berdasarkan perbedaan waktu

Pada gambar 3 dapat dilihat jika waktu perlakuan lebih singkat seperti 3 menit dan 5 menit, hanya menghasilkan daya bengkak masing-masing 19,50 g/g dan 12,32 g/g. Ini terjadi karena waktu yang diberikan belum cukup lama untuk menyebabkan perubahan besar pada struktur molekul pati, sehingga kemampuan untuk menahan air masih terbatas (Azkiyah *et al.*,

2024). Bahkan, perlakuan selama 15 menit yang lebih lama dibandingkan dengan 3 dan 5 menit justru menunjukkan daya bengkak yang lebih rendah yaitu 17,08 g/g. Ini menunjukkan bahwa waktu perlakuan tidak ideal juga dapat menyebabkan struktur pati mengalami perubahan kembali atau granula yang saling menggumpal, sehingga dapat mengurangi kemampuan pati untuk menyerap air (Budiarti & Sulistiawati, 2019).

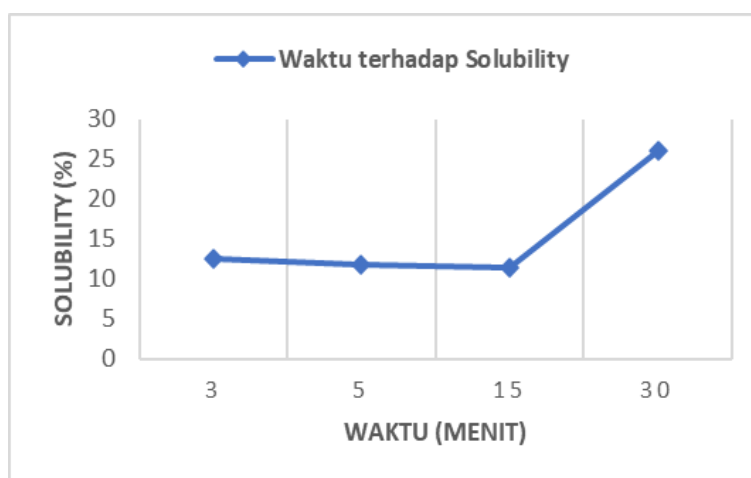
Nilai daya kembang yang tinggi menunjukkan bahwa butiran pati telah mengalami perubahan fisik yang signifikan karena pemanasan dan energi dari *microwave*. Proses ini juga dapat menyebabkan pelepasan sebagian molekul amilosa ke dalam medium, sehingga meningkatkan kemampuan pengikatan air. Pengaruh waktu dalam modifikasi pati ini sejalan dengan prinsip kinetika reaksi padat di mana semakin lama energi panas diberikan, maka transfer massa melalui proses difusi akan berlangsung lebih efektif. Kontak antara air dalam granula dan medan elektromagnetik *microwave* yang semakin lama akan menciptakan ketidakseimbangan osmotik yang pada akhirnya meningkatkan kapasitas penyerapan air sebelum mencapai titik kejenuhan (Ulyarti *et al.*, 2022; Putri & Zubaidah, 2017).

Pengaruh Waktu pada Modifikasi Pati dengan *Microwave Heat Treatment* terhadap *Solubility*

Modifikasi pati dengan gelombang mikro mengakibatkan pemanasan cepat dari dalam granula, yang menyebabkan terganggunya struktur kristalin dan melemahnya ikatan hidrogen. Perubahan ini meningkatkan kemampuan molekul amilosa dan amilopektin untuk berinteraksi dengan air, sehingga kelarutan meningkat. Pati yang dimodifikasi dengan *microwave* menunjukkan peningkatan kelarutan dibandingkan pati asli karena degradasi parsial struktur granula dan pelepasan fraksi amilosa yang lebih tinggi ke dalam medium air (Deka & Sit, 2016).

Dari tabel 1, dapat dilihat terdapat perbedaan penggunaan lama waktu dalam proses modifikasi pati dengan *microwave heat treatment* sehingga menghasilkan *solubility* atau kelarutan yang berbeda dari masing-masing jenis pati. Pada tabel 1 tersebut menunjukkan durasi metode *microwave heat treatment* tertinggi yaitu 30 menit pada tapioka yang menghasilkan kelarutan tertinggi sebesar 25.95 %. Waktu pemanasan terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap tingkat kelarutan, meskipun hubungan yang terbentuk tidak bersifat linear. Secara umum, peningkatan durasi pemanasan cenderung meningkatkan kelarutan hingga titik tertentu. Hal ini dikarenakan gelombang mikro mampu menembus granula pati dan menghasilkan gesekan antar molekul air serta pati, yang menyebabkan pemutusan ikatan hidrogen internal dan gangguan terhadap struktur semikristalin (Li *et al.*,

2019). Gangguan ini membuka struktur molekuler pati dan memungkinkan pelepasan molekul amilosa dan amilopektin, yang meningkatkan interaksi dengan air dan berdampak pada peningkatan kelarutan (Zhi *et al.*, 2022; Suri & Shingh., 2023).



Gambar 4. Grafik hasil *solubility* berdasarkan perbedaan waktu

Pengaruh durasi atau waktu pemanasan sangat signifikan terhadap hasil akhir. Pada perlakuan deDari tabel 1, dapat dilihat terdapat perbedaan penggunaan lama waktu dalam proses modifikasi pati dengan microwave heat treatment sehingga menghasilkan swelling power atau daya bengkak yang berbeda dari masing-masing jenis pati. Pada tabel 1 tersebut menunjukkan durasi metode microwave heat treatment tertinggi yaitu 30 menit pada tapioka yang menghasilkan daya bengkak tertinggi yaitu sebesar 34.07 g/g. Hal ini menunjukkan bahwa durasi perlakuan yang semakin tinggi memainkan peran yang signifikan dalam merubah karakteristik fisikokimia dari granula pati seperti meningkatkan swelling power pada pati ditandai dengan meningkatnya nilai swelling pada hasil. Hasil ini menunjukkan adanya kecenderungan bahwa semakin lama waktu perlakuan microwave, maka semakin besar daya bengkak yang dihasilkan. Peningkatan ini terjadi karena energi dari gelombang mikro mampu memutus ikatan hidrogen antar molekul amilosa dan amilopektin, serta menyebabkan disintegrasi parsial granula pati, yang pada akhirnya meningkatkan kapasitasnya dalam menyerap air. Pada durasi pendek (5–10 menit), struktur granula cenderung rusak sebagian, sehingga kelarutan meningkat. Sebaliknya, perlakuan dalam durasi lebih lama, justru dapat menurunkan kelarutan karena terbentuknya struktur heliks ganda amilosa yang lebih stabil. Struktur ini menyebabkan molekul menjadi lebih terorganisasi dan resisten terhadap pelarutan, sehingga menghambat interaksi dengan air (Zailani *et al.*, 2021). Efek serupa juga ditemukan pada pati tapioka. Perlakuan gelombang mikro menyebabkan perubahan struktur yang membuat fraksi amilosa lebih mudah larut. Perlakuan microwave yang terlalu lama (lebih dari

30 menit) justru dapat mengarah pada reorientasi molekul dan meningkatkan peluang retrogradasi. Retrogradasi ini menghasilkan struktur yang lebih rapat dan menurunkan kelarutan dibandingkan dengan tapioka alami (Sangadji *et al.*, 2024).

Pemilihan waktu pemanasan yang tepat merupakan aspek kritis dalam proses modifikasi pati menggunakan gelombang mikro. Waktu yang terlalu singkat tidak cukup mengubah struktur, sedangkan durasi yang terlalu lama berpotensi mengembalikan sifat kekristalan melalui retrogradasi. Optimalisasi durasi pemanasan perlu disesuaikan dengan karakteristik masing-masing jenis pati agar sifat kelarutan dapat ditingkatkan secara maksimal (Chandak *et al.*, 2022).

4. KESIMPULAN

Metode *microwave heat treatment* menunjukkan potensi signifikan sebagai modifikasi fisik pati yang efisien, lebih cepat dan hemat energi dibandingkan metode modifikasi kimia maupun enzimatik. Tinjauan terhadap berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam meningkatkan sifat fungsional pati, termasuk kelarutan, perilaku gelatinisasi, dan pencernaan, serta memperluas aplikasi dalam industri pangan berbasis pati dari bahan seperti talas, tapioka, rimpang teratai, dan sagu. Setiap jenis bahan baku menunjukkan kebutuhan waktu dan daya yang optimal secara berbeda. Intensitas daya yang terlalu tinggi serta durasi pemanasan yang terlalu lama cenderung menyebabkan kerusakan pada struktur granula dan penurunan kualitas fungsional pati. Pemilihan kombinasi daya dan waktu perlakuan menjadi variabel kritis dalam memperoleh modifikasi pati dengan karakteristik daya kembang dan kelarutan yang sesuai. Waktu pemanasan yang lebih panjang pada daya rendah cenderung menurunkan daya kembang namun tetap mampu mempertahankan atau sedikit meningkatkan kelarutan, tergantung pada jenis bahan dan kondisi kelembaban awalnya. Penelitian ini merekomendasikan agar studi selanjutnya memasukkan variabel tambahan seperti kadar air awal, ukuran partikel, serta integrasi dengan metode modifikasi lain untuk meningkatkan akurasi dan efektivitas teknologi MHT dalam pengembangan bahan pangan fungsional yang berdaya saing.

DAFTAR REFERENSI

- Abbas, K. A., Khalil, S. K., & Hussin, A. S. M. (2010). Modified starches and their usages in selected food products: a review study. *Journal of Agricultural Science*, 2, 90–100.
- Amalia, R., & Kumoro, A. C. (2015). Studi pengaruh rasio reaktan, pH, dan waktu reaksi terhadap sifat fisikokimia tepung gadung (*Dioscorea hispida* Dennst.) Terasetilasi. *Metana*, 11(02).
- Azkiyah, L., Witono, Y., Silalahi, N. K. B., Masahid, A. D., Fajrin, F. A., Paramu, H., & Restanto, D. P. (2024). Study of the response to the glycemic index of rice starch (*Oryza sativa* L) modified by physical and enzymatic treatment. *AcTion: Aceh Nutrition Journal*, 9(4), 703-712.
- Budiarti, G. I., & Sulistiawati, E. (2019). Aplikasi hydrogen rich water pada modifikasi tepung kentang dengan pengering gelombang mikro sebagai alternatif substitusi gandum. *Elkawnie J Islam Sci Technol*, 5(2), 128-38.
- Cai, M., Zhang, Y., Cao, H., Li, S., Zhang, Y., Huang, K., & Guan, X. (2024). Exploring the remarkable effects of microwave treatment on starch modification: From structural evolution to changed physicochemical and digestive properties. *Carbohydrate Polymers*, 122412.
- Chandak, A., Dhull, S. B., Chawla, P., Fogarasi, M., & Fogarasi, S. (2022). Effect of single and dual modifications on properties of lotus rhizome starch modified by microwave and γ -irradiation: A comparative study. *Foods*, 11(19), 2969.
- Danimayostu, A. A. (2017). Pengaruh penggunaan pati kentang (*Solanum tuberosum*) termodifikasi asetilasi-oksidasi sebagai gelling agent terhadap stabilitas gel natrium diklofenak. *Pharmaceutical journal of Indonesia*, 3(1), 25-32.
- Deka, D., & Sit, N. (2016). Dual modification of taro starch by microwave and other heat moisture treatments. *International Journal of Biological Macromolecules*, 92, 416-422.
- Faisal, M., Harianto, A., Hutasoit, J. P., Amrullah, S., & Ardiansyah, A. (2023). Pengaruh konsentrasi sodium tripolifosfat (STPP) terhadap sifat fisik dan kimia pati labu kuning termodifikasi (Modified cucurbita moschata starch) The effect of sodium tripolyphosphate (STPP).
- Haryanti, D., Sudarmadji, S., & Purnomo, E. H. (2014). Pengaruh suhu dan waktu pemanasan suspensi pati tapioka terhadap viskositas, kelarutan dan daya kembang. *Agritech*, 34(2), 157–165.
- Li, M., Zhu, K., Guo, X., Peng, W., & Zhou, H. (2019). Short-time microwave treatment affects the multi-scale structure and digestive properties of high-amylose maize starch. *Food Chemistry*, 278, 332–339.
- Matos, M., Marefati, A., Guti´errez, G., Wahlgren, M., & Rayner, M. (2016). Comparative emulsifying properties of octenyl succinic anhydride (OSA)-modified starch: Granular form vs dissolved state. *PloS One*, 11(8)

- Menéndez, J. A., Arenillas, A., Fidalgo, B., Fernández, Y., Zubizarreta, L., Calvo, E. G., & Bermúdez, J. M. (2010). Microwave heating processes involving carbon materials. *Fuel Processing Technology*, 91(1), 1-8.
- Nand, A. V., Charan, R. P., Rohindra, D., & Khurma, J. R. (2008). Isolation and properties of starch from some local cultivars of cassava and taro in Fiji. *South Pacific Journal of Natural Science*, 26, 45–48.
- Oyeyinka, S. A., Umaru, E., Olatunde, S. J., & Joseph, J. K. (2019). Effect of short microwave heating time on physicochemical and functional properties of Bambara groundnut starch. *Food Bioscience*, 28, 36-41.
- Parwiyanti, P., Pratama, F., Wijaya, A., Malahayati, N., & Lidasari, E. (2016). Sifat fisik pati ganyong (*canna edulis kerr.*) termodifikasi dan penambahan gum xanthan untuk rerotian. *Agritech*, 36(3), 335-343.
- Polnaya, F. J., Marseno, D. W., & Cahyanto, M. N. (2018). Physical properties and digestibility of resistant starch from phosphorylated sago starches. *Pakistan Journal of Nutrition*, 17(4), 199–206
- Pratama, F., Sari, I. P., Ridhowati, S., & Arsyad, F. S. (2020, April). A comparison of microwave and ultrasonic treatment on swelling power and water solubility of tapioca. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 497, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- Putri, W. D. R., & Zubaidah, E. (2017). *Pati: Modifikasi dan Karakteristiknya*. Universitas Brawijaya Press.
- Sangadji, R., Polnaya, F. J., & Tetelepta, G. (2024). Physicochemical characteristics of modified tapioca using microwave heating. *AGROMIX*, 15(1), 10-15.
- Santoso, S., Polnaya, F. J., & Picauly, P. (2024). The effect of modified heat moisture treatment with microwave on physicochemical characteristics of sago starch. *AGROMIX*, 15(2), 149–154.
- Sharma, M., Yadav, D. N., Singh, A. K., & Tomar, S. K. (2015). Rheological and functional properties of heat moisture treated pearl millet starch. *Journal of Food Science and Technology*.
- Shukri, R., Zhu, L., Seib, P. A., Maningat, C., & Shi, Y. C. (2015). Direct in-vitro assay of resistant starch in phosphorylated cross-linked starch. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 5, 1–9.
- Sukhija, S., Singh, S., & Riar, C. S. (2022). Effect of Single and Dual Modifications on Properties of Lotus Rhizome Starch Modified by Microwave and γ -Irradiation: A Comparative Study. *Foods*, 11(19), 2969.
- Suri, S., & Singh, A. (2023). *Modification of starch by novel and traditional ways: influence on the structure and functional properties*. *Sustainable Food Technology*, 1(3), 348–362.

- Ulyarti, U., Surhaini, S., Wahyuni, Y. S., & Nazarudin, N. (2022). Sifat Fisiko-Kimiawi Dan Fungsional Tepung Uwi (*Dioscorea Spp.*) Yang Di Modifikasi Menggunakan Cairan Sauerkraut. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 23(1), 73-88.
- Wang, M., Sun, M., Zhang, Y., Chen, Y., Wu, Y., & Ouyang, J. (2019). Effect of microwave irradiation-retrogradation treatment on the digestive and physicochemical properties of starches with different crystallinity. *Food Chemistry*, 298.
- Wei, B., Song, X., Zhang, Y., & Lu, X. (2020). Effect of heat treatment on the structural and physicochemical properties of lotus rhizome starch. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(2), e14316.
- Wei, W., Shao, Z., Qiao, R., Chen, W., Zhou, H., & Yuan, Y. (2021). Recent development of microwave applications for concrete treatment. *Construction and Building Materials*, 269, 121224.
- Wulandari, E., Marta, H., Lembong, E., & Ariela, F. (2018). The study of functional and pasting properties of Taro “SEMIR”(Colocasia Esculenta L. Schott) starch modified by various thermal process. *Journal of Powder Technology and Advanced Functional Materials*, 1(1), 36-47.
- Xie, Y., Yan, M., Yuan, S., Sun, S., & Huo, Q. (2013). Effect of microwave treatment on the physicochemical properties of potato starch granules. *Chemistry Central Journal*, 7(113), 1–7
- Zailani, M. A., Kamilah, H., Husaini, A., Seruji, A. Z. R. A., & Sarbini, S. R. (2022). Functional and digestibility properties of sago (*Metroxylon sagu*) starch modified by microwave heat treatment. *Food Hydrocolloids*, 122, 107042.
- Zhao, Y., Wang, L., & Liu, H. (2024). Exploring the remarkable effects of microwave treatment on starch modification: From structural evolution to changed physicochemical and digestive properties. *Carbohydrate Polymers*, 300, 120123.
- Zhi, W., Zhou, Y., Wang, R., Wang, M., Wang, W., Hu, A., & Zheng, J. (2022). *Effect of Microwave Treatment on the Properties of Starch in Millet Kernels*. *Starch - Stärke*, 9-10.