

Pemanasan Ohmik Roti Bebas Gluten Berbasis Tepung Kedelai Hitam-Beras: Kajian Suhu Dan Daya

Ohmic Heating of Gluten-Free Bread Based on Black Soybean-Rice Flour: Temperature and Electrical Power Study

Aji Sutrisno¹, Jenri Parlinggoman Hutasoit^{2*}, Aniswatul Khamidah³

¹Departemen Ilmu Pangan dan Bioteknologi, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

²Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Ilmu dan Teknologi Pertanian, Universitas Teknologi Sumbawa, Sumbawa, Indonesia

³Pusat Riset Teknologi dan Proses Pangan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jawa Barat, Indonesia

Email*): jenri.parlinggoman@uts.ac.id

Received:
26 March 2023

Revised:
10 August 2023

Accepted:
10 September 2023

Published:
27 September 2023

DOI:
10.29303/jrpb.v11i2.504

ISSN 2301-8119
e-ISSN 2443-1354

Tersedia online di
<http://jrpb.unram.ac.id/>

Abstract: Ohmic heating is a heating process that works based on passing electric current through resistive materials. This heating is known to have advantages such as producing uniform heat and a high heating rate. The purpose of this study was to determine the changes in temperature and power used in ohmic heating of gluten-free bread based on black soybean flour substituted with rice flour. The bread batter formulation in this research was based on black soybean flour with rice flour substitution (50, 40, 30, 20, 10 and 0%). The parameters of temperature and electrical power were obtained from the data logger. The data is calculated in formulas and displayed in curves as a function of time during the process. The results showed that the addition of rice flour or the higher the ratio of rice flour in the dough showed a rapid rate of temperature increase at its maximum value, as well as the initial electrical power value used during heating. Based on the calculation of the time needed to reach the optimal temperature of about 97 °C in each treatment, it was found that the treatment of 50% black soy flour + 50% rice flour (8 minutes 10 seconds), the treatment of 60% black soy flour + 40% rice flour (8 minutes 30 seconds), the treatment of 70% black soy flour + 30% rice flour (8 minutes 60 seconds), the treatment of 80% black soy flour + 20% rice flour (9 minutes 40 seconds), the treatment of 90% black soy flour + 10% rice flour (11 minutes 30 seconds), and the treatment of 100% black soy flour + 0% rice flour (12 minutes).

Keywords: energy; gluten-free bread; ohmic heating; temperature

Abstrak: Pemanasan ohmic merupakan proses pemanasan yang bekerja berdasarkan melewatkan arus listrik pada bahan yang bersifat resistif. Pemanasan ini diketahui memiliki kelebihan seperti menghasilkan panas seragam dan laju pemanasan yang tinggi. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui perubahan suhu dan daya yang digunakan dalam pemanasan ohmik roti bebas gluten berbasis tepung kedelai hitam yang disubstitusi tepung beras. Formulasi adonan roti perlakuan pada penelitian ini berbasis tepung kedelai hitam dengan substitusi tepung beras (50, 40, 30, 20, 10 dan 0%). Parameter suhu dan daya arus diperoleh dari hasil data logger. Data dikalkulasikan dalam rumus dan ditampilkan dalam kurva sebagai fungsi dari waktu selama proses. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan tepung beras atau semakin tinggi rasio tepung beras pada adonan menunjukkan laju peningkatan suhu yang cepat pada nilai maksimumnya, begitu juga dengan nilai daya listrik awal yang digunakan selama pemanasan. Berdasarkan perhitungan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu optimal sekitar 97 °C pada setiap perlakuan, diperoleh bahwa perlakuan 50% tepung kedelai hitam + 50% tepung beras (8 menit 10 detik), perlakuan 60% tepung kedelai hitam + 40% tepung beras (8 menit 30 detik), perlakuan 70% tepung kedelai hitam + 30% tepung beras (8 menit 60 detik), perlakuan 80% tepung kedelai hitam + 20% tepung beras (9 menit 40 detik),

perlakuan 90% tepung kedelai hitam + 10% tepung beras (11 menit 30 detik), dan perlakuan 100% tepung kedelai hitam + 0% tepung beras (12 menit).

Kata kunci: energi; pemanas ohmik; roti bebas gluten; suhu

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Konsep pemanasan ohmik (*Ohmic heating*) merupakan teknologi yang baru dan telah banyak diaplikasikan dalam pengolahan pangan, seperti blansing, evaporasi, dehidrasi, fermentasi dan pasteurisasi (Cappato et al., 2017; Kanjanapongkul, 2017; Mercali et al., 2014; Sagita et al., 2022; Varghese et al., 2014). Metode pemanasan ini bekerja berdasarkan melewati arus listrik pada matriks bahan sehingga menghasilkan panas dalam internal bahan (Bender & Schönlechner, 2020; Waziroh et al., 2021). Beberapa penelitian melaporkan bahwa karakteristik produk yang dihasilkan dengan metode pemanasan ohmik tidak jauh berbeda dengan pemanasan secara konvensional (Bender et al., 2019; Hutasoit et al., 2021; Waziroh et al., 2021). Selain itu, pemanasan dengan metode ohmik diketahui memiliki kelebihan seperti menghasilkan panas seragam dan lebih cepat dibandingkan pemanggangan konvensional. Proses pemanasan juga lebih singkat dan mengurangi proses pemanasan berlebih, dimana hal ini dapat berkontribusi untuk retensi yang lebih baik pada kualitas produk pangan seperti sifat nutrisinya (Jaeger et al., 2016).

Beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan pada aplikasi pemanasan ohmik adalah daya/energi yang digunakan, tegangan yang diaplikasikan, laju pemanasan dan suhu bahan makanan dipanaskan (Bender et al., 2019; Bender & Schönlechner, 2020). Selain itu, selama proses pemanasan perlu dikaji hubungan antara sifat bahan dengan perubahan suhu yang terjadi pada parameter proses. Berdasarkan penelitian F. De Li et al., (2004) melaporkan bahwa kandungan pati pada adonan roti dapat menurunkan konduktivitas listrik bahan, sedangkan tingkat suhu yang dihasilkan juga ditentukan oleh konduktivitas listrik pada bahan. Penurunan dalam konduktivitas listrik pada ranges gelatinisasi ini disebabkan oleh granula pati membengkak dan viskositas menurun, dimana dihasilkan penurunan arena pergerakan partikel dan peningkatan hambatan pada pergerakan partikel yang membengkak (F. De Li et al., 2004).

Pada umumnya dalam pembuatan roti, pati merupakan komponen utama penyusun bahan. Sehingga suhu gelatinisasi pati menarik perhatian untuk dikaji selama proses pemanasan. Untuk gelatinisasi pati, Chaiwanichsiri et al., (2001) menemukan bahwa konduktivitas menurun dengan tingkat gelatinisasi pati, dan mengindikasikan sebuah kemungkinan untuk mengukur suhu gelatinisasi pati dan tingkat gelatinisasi dengan pemanasan ohmik. Selain itu, pati yang tinggi dalam adonan dapat menghambat peningkatan suhu akibat penghambatan pergerakan elektron-elektron selama dialiri arus listrik. Proporsi bahan dengan kandungan pati yang berbeda perlu dikaji untuk mempelajari laju peningkatan suhu atau keseragaman suhu yang dihasilkan. Sehingga keberhasilan proses pemasakan dan proses gelatinisasi pati berjalan optimal (dalam hal ini suhu gelatinisasi tepung 60-80°C). Selain itu dalam penerapan listrik pada pengolahan pangan berbasis ohmik perlu dikaji energi yang digunakan untuk menentukan efisiensi proses. Konsumsi energi selama pemanasan sangat dipengaruhi oleh perubahan karakteristik adonan akibat suhu, penurunan kadar air, pembengkakan granula, mobilitas air (F. De Li et al., 2004; Norouzi et al., 2021). Sampai saat ini sangat terbatas informasi tentang perubahan suhu dan daya pada roti bebas gluten berbasis tepung kedelai-beras, dimana hal ini sangat penting dalam mendesain sistem pemanasan ohmik. Daya listrik yang digunakan selama proses pemanasan dan perubahan suhu menjadi parameter penting dalam memonitor pemanggangan roti, serta efisiensi biaya dan waktu yang digunakan selama proses.

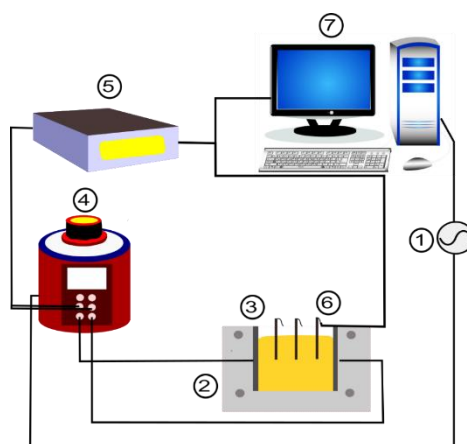
Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji perubahan suhu dan daya yang digunakan selama pemanasan adonan roti berbasis kedelai yang disubstitusi tepung beras.

METODE PENELITIAN

Alat

Alat utama yang digunakan pada penelitian ini adalah pemanas roti berbasis metode ohmik. Sketsa alat pemanas ohmik dapat dilihat pada Gambar 1. Perangkat pemanas ohmik terdiri dari cetakan yang terbuat dari bahan akrilik (Acrylic Polymethyl Methacrylate) ketebalan 0,5 cm, dimensi panjang 19,5, lebar 10, tinggi 10 cm, dua elektroda stainless steel ($8,5 \times 9$ cm) dengan ketebalan 25 mm, jarak antara elektroda 12 cm pada cetakan, Slide Regulator (Takayosh, 50 Hz, 0-260 Volt, Japan) sebagai sumber arus, Data logger (microcontroller Arduino, China) yang dilengkapi dengan sensor arus dan suhu.



Gambar 1. Sketsa pemanasan ohmik yang meliputi (1) arus, (2) cetakan akrilik, (3) elektroda, (4) Slide Regulator/power supply, (5) data logger, (6) thermocouple, (7) komputer

Alat pendukung yang digunakan dalam pembuatan adonan roti bebas gluten adalah mixer yang dilengkapi whisks hook (KLAZ 220-240 V), alat fermentasi (Proofer Getra Gas Manual), timbangan digital (CAMRY), pengaduk, sendok, kuas, termometer, gelas ukur, stopwatch, baskom, sendok, piring kecil, pisau, plastik wrap, digital laser tachometer, dan sarung tangan

Bahan

Bahan baku utama yang digunakan adalah tepung kedelai hitam. Proses pembuatan tepung kedelai hitam dilakukan terlebih dahulu. Biji kedelai hitam diperoleh dari Badan Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi, Malang, Indonesia. Proses pembuatan tepung dilakukan dengan metode kering yang diawali dengan penyortiran, pengupasan, kemudian penggilingan menggunakan *Hammer mills* dan diayak menggunakan ayakan ukuran 80 mesh. Tepung kedelai hitam kemudian dianalisis proksimat, dimana diperoleh kadar air $9,73 \pm 0,04\%$, kadar protein $43,75 \pm 0,55\%$, kadar lemak $21,15 \pm 0,04\%$, kadar abu $4,99 \pm 0,03\%$, kadar karbohidrat $20,38 \pm 0,58\%$ dan kadar pati $4,86 \pm 0,24\%$. Bahan lain termasuk tepung beras (kadar pati $71,54 \pm 0,83\%$), ragi kering, gula, garam, mentega, susu cair, telur, emulsifier, diperoleh pasar Malang, Indonesia. Bubuk enzim *transglutaminase* (TGase) (konsentrasi aktivitas enzim 120 U/g, maltodextrin 100%) diperoleh dari PT. Agung Mulia (Supplier Taixing Dongsheng Bio-Tech Co.Ltd-China). Bubuk konjak glukomanan yang akan digunakan dalam pembuatan gel glukomanan diperoleh dari Universitas Brawijaya.

Preparasi Adonan dan Pemanasan Ohmik

Formulasi adonan roti bebas gluten yang digunakan pada perlakuan A, B, C, D, E dan F ditunjukkan pada Tabel 1. Proses pembuatan adonan diawali dengan melarutkan ragi dan gula dalam 100 ml air (25 °C), dan diaktifkan dalam *proofer* selama 3 menit. Air yang tersisa digunakan untuk melarutkan TGase. Bahan lainnya dicampur menggunakan mixer yang dilengkapi dengan hook whisk dengan kecepatan 84 rpm selama 2 menit. Setelah bahan tercampur, kemudian ditambahkan suspensi ragi dan TGase, kemudian diaduk hingga kecepatan 126 rpm selama 5 menit. Setelah tercampur rata, adonan dimasukkan ke dalam cetakan yang telah diolesi mentega sebelumnya, kemudian ditutup dengan plastik wrap, dan dimasukkan ke dalam convection proofer (30-35 °C) selama 40 menit.

Tabel 1. Formulasi bahan roti yang mengandung tepung kedelai hitam dan tepung beras dengan rasio yang berbeda.

Bahan (%)	Perlakuan					
	A	B	C	D	E	F
Tepung kedelai hitam	50	60	70	80	90	100
Tepung beras	50	40	30	20	10	0
Ragi	3	3	3	3	3	3
Gula	25	25	25	25	25	25
Garam	2	2	2	2	2	2
Emulsifier	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
TGase	1	1	1	1	1	1
Telur	10	10	10	10	10	10
Air	180	180	180	180	180	180
Gel glukomanan (konsentrasi 0,2%)	5	5	5	5	5	5

Proses pemanasan roti dilakukan dari sumber arus AC dengan frekwensi 50 Hz. Nilai voltase yang diaplikasikan yaitu 90 V (7,70 V/cm) dengan durasi pemanasan selama 30 menit. Roti yang sudah dipanggang kemudian dipisahkan dari loyang dan didinginkan pada suhu ruang untuk analisa lanjutan setelah 3 jam. Selama pemanggangan roti dengan menggunakan sistem ohmik dilakukan pencatatan parameter proses dari awal sampai akhir pemanggangan.

Pengukuran suhu dilakukan dengan menggunakan data logger yang dilengkapi dengan 3 *thermocouple*. Dua *sensor suhu* (*Thermocouple 1 & Thermocouple 3*) ditempatkan pada posisi yang berjarak 2,5 cm dari elektroda dan satu sensor suhu lainnya (*Thermocouple 2*) ditempatkan di Tengah. Dalam pemanasan dengan menggunakan metode ohmic dilakukan dengan melewati sumber arus listrik pada bahan yang elektrokonduktif. Panas pada internal bahan, dihasilkan dari efek Joule, dampak disipasi energi listrik menjadi panas, dikalkulasikan persatuan waktu dan volume dalam bahan:

$$q = \sigma (E)^2 \dots\dots\dots(1)$$

Dimana, q adalah laju panas internal yang dihasilkan per volume (W/m^3), E adalah medan listrik (V/m), dan σ adalah konduktivitas listrik (S/m) (Gavahian et al., 2019).

Sedangkan energi atau daya yang digunakan ditentukan sesuai (Darvishi et al., 2021)

$$W = V \times I \dots\dots\dots(2)$$

Dimana, W adalah energi yang digunakan (J), V adalah tegangan atau beda potensial listrik (V), dan I adalah intensitas arus (A)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Substitusi Tepung Beras Terhadap Perubahan Suhu

Laju pemanasan pada bahan menentukan tingkat keberhasilan pemanasan ohmik untuk digunakan dalam pengolahan pangan. Perubahan suhu pada adonan roti bebas gluten tepung

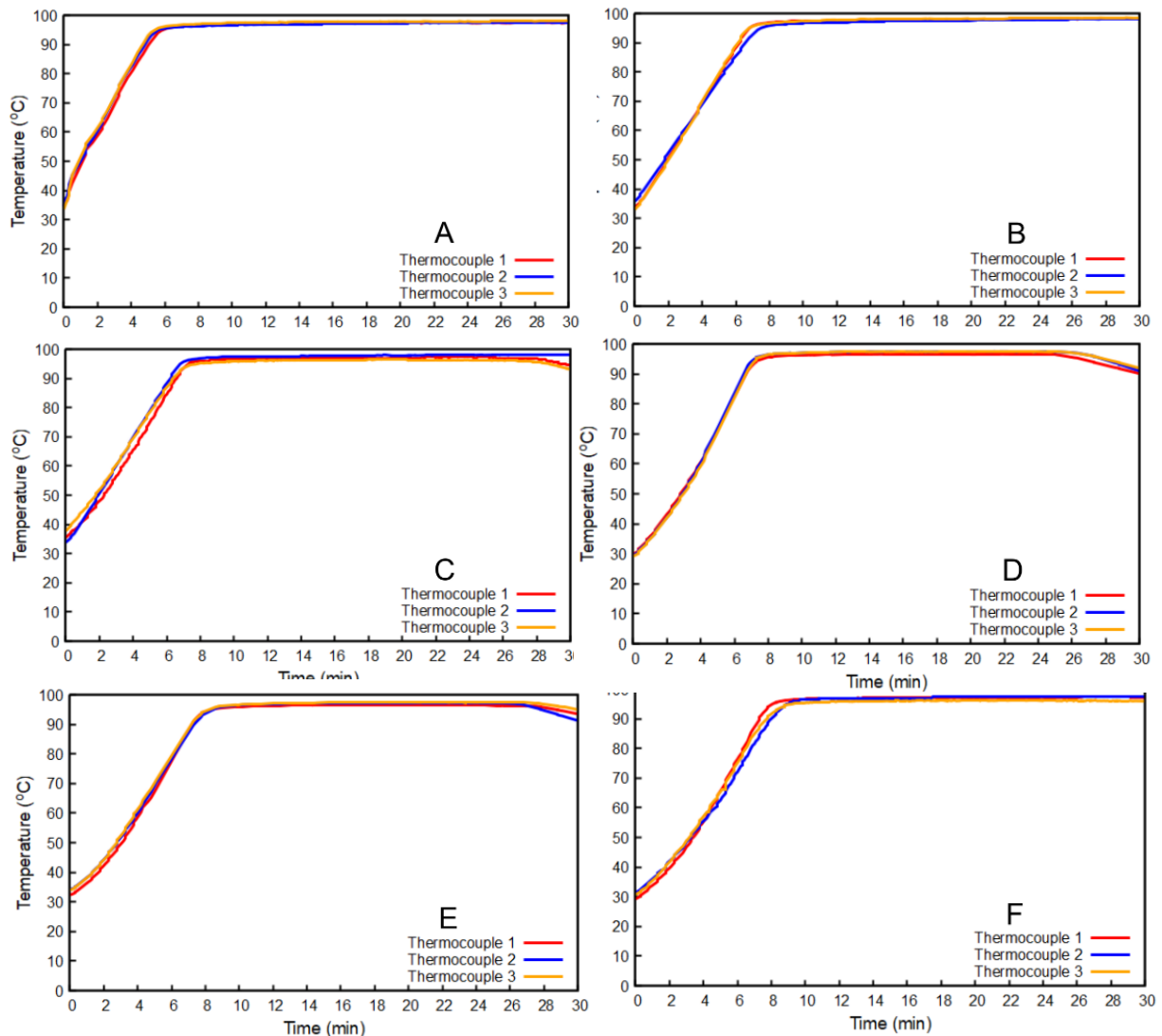
kedelai yang disubstitusi tepung beras ditunjukkan pada Gambar 2 selama proses pemanasan. Secara keseluruhan, suhu pemanasan yang terekam pada ketiga *thermocouple* memiliki gradien suhu yang sangat kecil, sehingga suhu pemanasan pada penelitian ini diasumsikan bersifat volumetrik. Suhu adonan dengan perlakuan gradien 7.5 V/cm (90V) ini mampu menghasilkan suhu optimal hingga (97°C). Biasanya pemanasan ohmik menghasilkan laju pemanasan lebih tinggi dibandingkan pemanasan konvensional. Berdasarkan hasil penelitian Gavahian et al., (2019) melaporkan bahwa pemanasan berbasis ohmik pada beras menunjukkan laju pemanasan dan evaporasi yang lebih cepat dibandingkan pemanasan konvensional dan *microwave*.

Laju pemanasan dipengaruhi perlakuan substitusi tepung beras pada adonan. Berdasarkan perhitungan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu optimal sekitar 97 °C pada setiap perlakuan, diperoleh bahwa perlakuan A (50% tepung kedelai hitam + 50% tepung beras) membutuhkan waktu 8 menit 10 detik, perlakuan B (60% tepung kedelai hitam + 40% tepung beras) membutuhkan waktu 8 menit 30 detik, perlakuan C (70% tepung kedelai hitam + 30% tepung beras) membutuhkan waktu 8 menit 60 detik, perlakuan D (80% tepung kedelai hitam + 20% tepung beras) membutuhkan waktu 9 menit 40 detik, perlakuan E (90% tepung kedelai hitam + 10% tepung beras) membutuhkan waktu 11 menit 30 detik, dan perlakuan F (100% tepung kedelai hitam + 0% tepung beras) membutuhkan waktu 12 menit. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi penambahan tepung beras yang diterapkan maka semakin cepat pula menaikkan nilai suhu pada titik maksimumnya. Hal ini sangat terkait bahwa viskositas bahan yang lebih rendah akan meningkatkan peningkatan suhu (Chesteron et al., 2013; Norouzi et al., 2021; Sabanci & Icier, 2017). Penurunan viskositas larutan dapat meningkatkan pergerakan partikel-partikel untuk bergerak bebas. Sebaliknya, ketika viskositas meningkat, partikel bermuatan akan mengalami lebih banyak tahanan dalam bergerak melalui larutan (berjalan lambat). Ini dapat mengurangi laju konduktivitas listrik larutan. Jika arus listrik yang lebih tinggi mengalir melalui bahan dengan resistansi tetap, maka akan ada peningkatan dalam produksi panas (energi termal), yang pada gilirannya dapat menyebabkan kenaikan suhu bahan tersebut.

Dalam formulasi adonan penelitian ini, semakin tinggi substitusi tepung beras atau proporsi tepung beras lebih besar daripada tepung kedelai hitam menunjukkan viskositas adonan yang lebih rendah/cair. Hal ini akan menyebabkan mobilitas elektron akan meningkat selama pemanasan. Sehingga akan mempengaruhi konduktivitas listriknya yang selanjutnya berdampak pada laju peningkatan suhu. Selain itu, komposisi pati yang didominasi pada tepung beras akan mempengaruhi konduktivitas listriknya. Dalam hal ini, komposisi pati tepung beras (71,54 ± 0,83%) lebih besar daripada tepung kedelai (4,86 ± 0,24%). Chaiwanichsiri et al., (2001) melaporkan bahwa perbedaan komposisi pati dapat mempengaruhi konduktivitas listrik pada pemanasan. Pati biasanya mengandung sejumlah kecil grup fosfat yang berikatan pada amilopektin, yang dapat berperan sebagai ion bebas dan memodifikasi konduktivitas listrik selama gelatinisasi pati. Sesuai Wong et al., (2011) penelitian pati mengandung sejumlah fosfor, yang mempengaruhi gelatinisasi pati selama pemanasan ohmik. Fosfor merupakan fosfat ester bermuatan negatif dalam medan listrik, dapat mengganggu desintegrasi granula pati dan difusi air pada granula pati dan menurunkan kestabilan kristalin selama pemanasan ohmik.

Selain alasan di atas, komponen lain seperti lemak dan protein yang didominasi pada tepung kedelai hitam akan mempengaruhi sifat pemastan (*pasting*) selama pemanasan. Pada umumnya, lemak dan protein bahan akan memperlambat pembengkakan granula, menyebabkan sedikit amilosa *leaching* dan meningkatkan suhu gelatinisasi (Chaiwanichsiri et al., 2001). Komponen ini dapat juga berinteraksi dengan dengan amilosa, memperlambat gelatinisasi pati, menurunkan konduktivitas listriknya dan meningkatkan waktu proses pemanasan. An and King, (2007) mengidentifikasi perbedaan gelatinisasi pati selama

pemanasan ohmik pada suspensi pati bergantung pada kadar amilosanya. Rasio antara amilosa dan amilopektin mempengaruhi karakteristik fisik pati seperti pembengkakan, gelatinisasi dan retrogradasi (da Silva et al., 2019). He and Hosney, (1991) mengkonfirmasi bahwa gelatinisasi pati menghasilkan berkurangnya ketersediaan air, menurunkan pergerakan ion-ion, meningkatkan resistensi adonan, dan sebaliknya menurunkan konduktivitas listriknya.



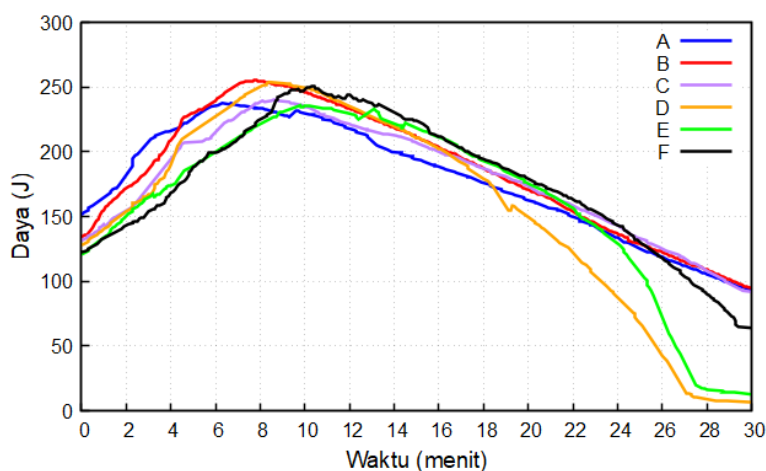
Gambar 2. Perubahan suhu adonan roti yang mengandung tepung kedelai hitam 50% dan tepung beras 50% (A), tepung kedelai hitam 60% dan tepung beras 40% (B), tepung kedelai hitam 70% dan tepung beras 30% (C), tepung kedelai hitam 80% dan tepung beras 20% (D), tepung kedelai hitam 90% dan tepung beras 10% (E), tepung kedelai hitam 100% (F)

Daya Arus Listrik

Substitusi tepung beras sangat mempengaruhi nilai daya listrik yang digunakan selama proses pemanasan (Gambar 3). Pada proses pemanasan adonan, ketika adonan dialiri sumber arus nilai daya yang dihasilkan memiliki perbedaan yang signifikan. Pada Gambar 3 menunjukkan nilai daya meningkat secara linear dengan meningkatnya substitusi beras yang diterapkan. Nilai daya listrik pada tingkat penambahan tepung beras bervariasi yaitu pada perlakuan A (50% tepung kedelai hitam + 50% tepung beras) sekitar 151,2-237,6 J , perlakuan

B (60% tepung kedelai hitam + 40% tepung beras) sekitar 134,1-257,6 J, perlakuan C (70% tepung kedelai hitam + 30% tepung beras) sekitar 131,4-240,3 J, perlakuan D (80% tepung kedelai hitam + 20% tepung beras) sekitar 127,8-252,9 J, perlakuan E (90% tepung kedelai hitam + 10% tepung beras) sekitar 120,6-235,8 J, dan perlakuan F (100% tepung kedelai hitam + 0% tepung beras) sekitar 122,4-250,2 J. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai daya awal meningkat dengan meningkatnya penambahan tepung beras. Besarnya nilai daya listrik awal yang digunakan sangat berkaitan dengan viskositas atau kekentalan adonan. Semakin rendah viskositas adonan maka semakin meningkat laju pergerakan elektron yang dihasilkan sehingga memaksimalkan penggunaan daya untuk proses.

TGase akan mengkatalisis deamidasi protein glutelin (beras) dan protein glutamin (kedelai hitam) sehingga berdampak pada tingkat kelarutan adonan (X. Li et al., 2018; Pongjaruvat et al., 2014). Kadar protein yang lebih tinggi pada tepung kedelai hitam bertindak sebagai substrat TGase akan mendominasi pembentukan ikatan kimia molekul besar sehingga meningkatkan kekentalan adonan dibandingkan tepung beras. Selain itu, ukuran granula pada tepung beras lebih kecil daripada tepung kedelai hitam. Sehingga rasio tepung beras yang lebih tinggi akan menghasilkan penurunan ikatan antar partikel yang selanjutnya akan menghasilkan adonan dengan viskositas yang lebih cair. Akan tetapi, jumlah energi yang digunakan selama pemanasan akan menurun saat terjadi perubahan karakteristik adonan akibat suhu, penurunan kadar air, pembengkakan granula, mobilitas air (F. De Li et al., 2004; Norouzi et al., 2021). Pada menit ke 6-8 terjadi penurunan daya selama proses pemanasan berlangsung yang disebabkan terjadinya penurunan viskositas adonan dengan berlangsungnya proses penguapan. Dalam konteks energi listrik, perubahan karakteristik bahan dan peningkatan viskositas larutan umumnya akan terjadi hambatan pergerakan ion, terutama jika viskositas tersebut tinggi.



Gambar 3. Perubahan daya listrik yang digunakan pada adonan roti yang mengandung tepung kedelai hitam 50% dan tepung beras 50% (A), tepung kedelai hitam 60% dan tepung beras 40% (B), tepung kedelai hitam 70% dan tepung beras 30% (C), tepung kedelai hitam 80% dan tepung beras 20% (D), tepung kedelai hitam 90% dan tepung beras 10% (E), tepung kedelai hitam 100% (F).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pemanasan ohmik merupakan teknologi terbaru yang dapat diaplikasikan pada proses pemanasan produk pangan seperti roti bebas gluten berbasis tepung kedelai hitam yang disubstitusi dengan tepung beras. Selama pemanasan adonan menghasilkan suhu pemanasan yang seragam dan suhu optimal dapat mencapai hingga 97 °C. Dari parameter suhu diperoleh bahwa substitusi penambahan tepung beras pada adonan atau semakin tinggi rasio tepung beras pada adonan menunjukkan laju peningkatan suhu yang cepat pada nilai

maksimumnya, begitu juga dengan nilai daya listrik awal yang digunakan selama pemanasan. Besarnya laju peningkatan suhu dan nilai daya listrik awal yang digunakan sangat berkaitan dengan penurunan viskositas adonan, yang berdampak pada pergerakan elektron-elektron bahan dan konduktivitas listriknya selama proses pemanasan roti. Daya listrik yang digunakan dan perubahan suhu menjadi parameter penting dalam memonitor pemanggangan roti dan efisiensi biaya dan waktu yang digunakan selama proses.

Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengkaji hubungan antara pati dan konduktivitas listrik selama proses pemanasan ohmik pada adonan roti bebas gluten berbasis tepung kedelai hitam-tepung beras.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Brawijaya yang sudah memberikan hibah penelitian melalui program penelitian hibah doktor.

PENDANAAN

Penelitian ini didukung dana oleh Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Brawijaya, Indonesia.

CONFLICT OF INTEREST

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan yang dapat memengaruhi objektivitas atau integritas publikasi karya ini. Selain itu, kami ingin menegaskan bahwa kami telah mengikuti dengan ketat standar etika penelitian sepanjang proses penelitian dan penulisan. Ini termasuk menghindari plagiarisme, memastikan bahwa *informed consent* telah diperoleh dari semua subjek yang terlibat dalam penelitian, menghindari pelanggaran etika, serta tidak terlibat dalam pemalsuan data, publikasi ganda, penyerahan ganda, atau redundansi. Kami berkomitmen untuk menjaga integritas ilmiah dan etika penelitian dalam semua aspek penulisan ini.

DAFTAR REFERENSI

- An, H. J., & King, J. M. (2007). Thermal characteristics of ohmically heated rice starch and rice flours. *Journal of Food Science*, 72(1). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00239.x>
- Bender, D., Gratz, M., Vogt, S., Fauster, T., Kinner, M., Jäger, H., & Schoenlechner, R. (2019). *Ohmic Heating – a Novel Approach for Gluten-Free Bread Baking*. 1603–1613.
- Bender, D., & Schönlechner, R. (2020). Innovative approaches towards improved gluten-free bread properties. In *Journal of Cereal Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102904>
- Cappato, L. P., Ferreira, M. V. S., Guimaraes, J. T., Portela, J. B., Costa, A. L. R., Freitas, M. Q., Cunha, R. L., Oliveira, C. A. F., Mercali, G. D., Marzack, L. D. F., & Cruz, A. G. (2017). Ohmic heating in dairy processing: Relevant aspects for safety and quality. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 62). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.010>
- Chaiwanichsiri, S., Ohnishi, S., Suzuki, T., Takai, R., & Miyawaki, O. (2001). Measurement of electrical conductivity, differential scanning calorimetry and viscosity of starch and flour suspensions during gelatinisation process. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(15). <https://doi.org/10.1002/jsfa.983>

- Chesterton, A. K. S., De Abreu, D. A. P., Moggridge, G. D., Sadd, P. A., & Wilson, D. I. (2013). Evolution of cake batter bubble structure and rheology during planetary mixing. *Food and Bioproducts Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.09.005>
- da Silva, A. M., Scherer, L. G., Daudt, R. M., Spada, J. C., Cardozo, N. S. M., & Marczak, L. D. F. (2019). Effects of starch source and treatment type - Conventional and ohmic heating - On stability and rheological properties of gels. *LWT*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.006>
- Gavahian, M., Chu, Y. H., & Farahnaky, A. (2019). Effects of ohmic and microwave cooking on textural softening and physical properties of rice. *Journal of Food Engineering*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.010>
- He, H., & Hosney, R. C. (1991). A Critical Look at the Electric Resistance Oven. *Cereal Chemistry*, 68(2).
- Hutasoit, J. P., Sutrisno, A., Murtini, E. S., & Latriyanto, A. (2021). The effect of transglutaminase on gluten-free soy bread baked using ohmic heating. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 924(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/924/1/012041>
- Jaeger, H., Roth, A., Toepfl, S., Holzhauser, T., Engel, K. H., Knorr, D., Vogel, R. F., Bandick, N., Kulling, S., Heinz, V., & Steinberg, P. (2016). Opinion on the use of ohmic heating for the treatment of foods. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 55). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.007>
- Kanjanapongkul, K. (2017). Rice cooking using ohmic heating: Determination of electrical conductivity, water diffusion and cooking energy. *Journal of Food Engineering*, 192, 1-10. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2016.07.014>
- Li, F. De, Li, L. Te, Li, Z., & Tatsumi, E. (2004). Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 62(2). [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00199-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00199-7)
- Li, X., Ye, C., Tian, Y., Pan, S., & Wang, L. (2018). Effect of ohmic heating on fundamental properties of protein in soybean milk. *Journal of Food Process Engineering*, 41(3). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12660>
- Mercali, G. D., Schwartz, S., Marczak, L. D. F., Tessaro, I. C., & Sastry, S. (2014). Ascorbic acid degradation and color changes in acerola pulp during ohmic heating: Effect of electric field frequency. *Journal of Food Engineering*, 123, 1-7. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2013.09.011>
- Norouzi, S., Fadavi, A., & Darvishi, H. (2021). The ohmic and conventional heating methods in concentration of sour cherry juice: Quality and engineering factors. *Journal of Food Engineering*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110242>

- Pongjaruvat, W., Methacanon, P., Seetapan, N., Fuongfuchat, A., & Gamonpilas, C. (2014). Influence of pregelatinised tapioca starch and transglutaminase on dough rheology and quality of gluten-free jasmine rice breads. *Food Hydrocolloids*. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.09.004>
- Sabancı, S., & Icier, F. (2017). Applicability of ohmic heating assisted vacuum evaporation for concentration of sour cherry juice. *Journal of Food Engineering*, 212, 262–270. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2017.06.004>
- Sagita, D., Setiaboma, W., Kristanti, D., Kurniawan, Y. R., Hidayat, D. D., Darmajana, D. A., Sudaryanto, A., & Nugroho, P. (2022). Experimental investigation of heating pattern, energy requirement and electrical conductivity in a batch ohmic heating system for coffee fermentation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 76, 102946. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2022.102946>
- Varghese, K. S., Pandey, M. C., Radhakrishna, K., & Bawa, A. S. (2014). Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. In *Journal of Food Science and Technology* (Vol. 51, Issue 10). <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0710-3>
- Waziroh, E., Bender, D., Saric, A., Jaeger, H., & Schoenlechner, R. (2021). Ohmic baking of gluten-free bread: Role of starch and flour on batter properties. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146567>
- Wong, L. L., Xu, Y. W., Lu, Z. H., & Li, L. Te. (2011). Correlation of electrical conductivity and thermal properties of native starch during ohmic heating. *International Journal of Food Engineering*, 7(5). <https://doi.org/10.2202/1556-3758.2228>