

# Pengembangan roti berbahan pati jagung dengan modifikasi enzimatis & pemanas ohmik (Kajian: pengaruh variasi tegangan dan transglutaminase terhadap karakteristik produk)

*[Development of corn starch-based bread with enzymatic modification & ohmic heating: study effect of voltage and transglutaminase variations on product characteristics]*

Jenri Parlinggoman Hutasoit<sup>1\*</sup>, Ariskanopitasari<sup>2</sup>, dan Aniswatul Khamidah<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Ilmu dan Teknologi Pertanian, Universitas Teknologi Sumbawa

<sup>2</sup> Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Ilmu dan Teknologi Pertanian, Universitas Teknologi Sumbawa

<sup>3</sup> Pusat Riset Teknologi dan Proses Pangan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Email korespondensi : jenri.parlinggoman@uts.ac.id

Diterima : 8 September 2023 , Disetujui : 16 Maret 2024 , DOI: 10.23960/jthp.v29i2.86-99

## ABSTRACT

*The main challenges in producing gluten-free bread are closely related to its development, texture, and nutrition. This research consisted of 2 stages. Stage 1 was aimed to determine the effect of voltage variations (70 V, 80 V, 90 V, 100 V, 110 V, 120 V, and conventional baking as a control) on bread characteristics and process parameters. The experiment was arranged as non-factorial in a completely randomized design with 3 replications. The best results of the first stage were applied in stage 2, aimed to determine the effect of various concentrations of TGase (0, 0.5, 1, 1.5, 2, and 2.5%). The data were processed using analysis of variance, then further tested using Tukey's at the 5% level. The 120 V voltage gradient treatment was found to be the best treatment. It shows specific volume  $3.17 \pm 0.17$  cm<sup>3</sup>/g, baking loss  $14.58 \pm 1.50\%$ , brightness  $50.97 \pm 3.27$ , hardness  $3.76 \pm 0.11$ , cohesive  $0.34 \pm 0.03$ , pore density  $84 \pm 2.52$ . In addition, baking at a higher voltage level increased the temperature rate and electrical conductivity. The 120 V voltage treatment shows the time required to reach a maximum temperature of 97°C was 3 minutes 5 seconds, and an electrical conductivity value of 0.26-0.51 S/m. Based on the TGase treatment, it was found that when bread dough was applied with a higher TGase concentration, the specific volume, hardness, chewiness, resilience, cohesiveness and springiness, average pore size, and pore porosity of the bread increased.*

*Keywords: characteristics, gluten-free bread, ohmic heating, strain, transglutaminase enzyme*

## ABSTRAK

Tantangan utama dalam memproduksi roti bebas gluten berkaitan erat dengan pengembangan, tekstur, dan karakteristik nutrisinya. Tahap pemanggangan merupakan salah satu rangkaian proses terpenting dalam pembuatan roti. Penelitian ini terdiri dari 2 tahap yaitu tahap 1 yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi tegangan terhadap karakteristik roti dan perubahan parameter proses. Penelitian disusun secara non-faktorial, dalam rancangan acak lengkap dengan tiga ulangan. Perlakuan berupa gradien tegangan yang terdiri dari 7 taraf (pemanggangan metode ohmik dengan gradien tegangan 70 V, 80 V, 90 V, 100 V, 110 V, 120 V, dan pemanggangan konvensional sebagai kontrol). Hasil gradien tegangan terbaik digunakan dalam penelitian tahap 2. Tahap 2 bertujuan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi TGase (0, 0,5, 1, 1,5, 2 dan 2,5%). Data diolah dengan sidik ragam kemudian diuji lanjut menggunakan uji Tukey pada taraf 5%. Berdasarkan evaluasi karakteristik roti, diperoleh perlakuan gradien tegangan 120V merupakan perlakuan terbaik. Ini menunjukkan volume spesifik  $3,17 \pm 0,17$  cm<sup>3</sup>/g, *baking loss*  $14,58 \pm 1,50\%$ , kecerahan  $50,97 \pm 3,27$ , *hardness*  $3,76 \pm 0,11$ , kohesif  $0,34 \pm 0,03$ , densitas pori  $84 \pm 2,52$ . Berdasarkan parameter proses diketahui bahwa pada saat adonan dipanggang dengan tingkat tegangan yang lebih tinggi menunjukkan laju suhu dan daya hantar listrik yang meningkat. Perlakuan tegangan 120 V menunjukkan waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu maksimum 97°C selama 3 menit 5 detik, dan nilai konduktivitas listrik 0,26-0,51 S/m. Berdasarkan perlakuan enzim TGase diperoleh bahwa ketika adonan roti diterapkan dengan konsentrasi TGase yang lebih tinggi, maka secara linear meningkatkan volume spesifik, nilai *hardness*, *chewiness*, *resilience*, *cohesiveness* dan *springiness*, ukuran rata-rata pori, dan porositas pori roti yang dihasilkan.

Kata kunci: enzim transglutaminase, karakteristik, pemanasan ohmik, roti bebas gluten, tegangan

## Pendahuluan

Faktor faktor penting dalam memproduksi roti bebas gluten biasanya sangat erat kaitannya dengan karakteristik roti seperti, tekstur, sensorik, umur simpan dan kandungan nutrisinya. Gluten merupakan protein yang paling esensial dalam produk-produk berbasis gandum, rey dan barley, yang berperan signifikan pada tekstur dan penampakan akhir roti yang dihasilkan (Wieser, 2007). Hal ini juga berperan dalam proses penanganan adonan roti karena menunjukkan sifat viskoelastis, resistensi pencampuran dan kemampuan pengembangan adonan roti yang dihasilkan. Berbeda halnya dengan roti bebas gluten, yang mana bahan baku dalam pembuatan roti ini adalah jenis tepung atau pati dari jagung, singkong, umbi-umbian dan kacang-kacangan lainnya. Ketiadaan jenis protein ini dalam adonan roti bebas gluten biasanya menunjukkan kelemahan seperti karakteristik pengembangan, sensorik dan nutrisi roti yang lebih rendah dibandingkan dengan roti gandum. Hingga saat ini, penelitian terus dilakukan untuk mengembangkan inovasi dan pendekatan terbaru dalam meningkatkan kualitas roti bebas gluten seperti dengan penggunaan bahan baku terbaru, penambahan bahan tambahan pangan, penyesuaian kondisi proses dan teknologi alternatif lain (Capriles & Arêas, 2014; da Rosa & Thys, 2019; Gao et al., 2012; Gusmão et al., 2019). Pengembangan ini juga didorong terjadinya peningkatan permintaan produk bebas gluten yang menyebabkan pertumbuhan segmen pasar yang cepat dan signifikan. Konsumen produk bebas gluten ini antara lain individu yang mengalami penyakit celiac, dermatitis *herpetiformis*, *autisme*, *non-celiac* gluten *sensibility* (Xhakollari et al., 2019).

Pada seluruh rangkaian tahap proses pembuatan roti, sesi pemanggangan merupakan salah satu proses yang paling kontroversial. Serangkaian perubahan fisik, kimia dan biologis seperti penguapan air, pembentukan struktur, ekspansi volume, denaturasi protein, gelatinisasi pati, pembentukan kerak roti dan sebagainya berlangsung pada tahap ini (Bender et al., 2019). Biasanya, metode pemanggangan oven konvensional masih menjadi alternatif utama dalam memanggang roti, akan tetapi beberapa karakteristik roti yang diinginkan kadang-kadang masih sesuai yang diharapkan. Roti yang dihasilkan masih memiliki beberapa kelemahan seperti kurang menarik, rendah nutrisi, bantat, dan waktu proses pemanggangan lama, serta konsumsi energi yang besar (Bender & Schönlechner, 2020; Waziirah et al., 2021). Tentunya hal ini dihubungkan dengan penggunaan suhu tinggi, dimana berdampak negatif pada penurunan konsistensi struktur roti, penurunan nutrisi dan perubahan sifat sensorik roti. Biasanya, penguat struktur roti bebas gluten hanya mengandalkan gelatinisasi pati, sehingga penguat ini terbatas dalam menstabilkan dan menahan udara selama proses. Selain itu, struktur pengembangan roti yang biasanya dibentuk oleh jejaring antar protein menghasilkan bantat karena terjadi denaturasi protein pada suhu tinggi oven konvensional (170-220 °C). Adonan roti bebas gluten juga biasanya membutuhkan penggunaan air dengan volume yang tinggi sehingga menghasilkan karakteristik viskoelastik adonan yang buruk untuk pengembangan.

Baru-baru ini, aplikasi sistem pemanasan ohmik dalam pemanggangan roti telah membantu memecahkan masalah-masalah dalam pengolahan roti bebas gluten (Bender & Schönlechner, 2020; Waziirah et al., 2021). *Ohmic heating* juga dikenal sebagai pemanasan Joule atau pemanasan resistif, merupakan proses pemanasan berdasarkan pada pelewatan arus listrik melalui bahan, yang digunakan sebagai hambatan (Sakr & Liu, 2014). Teknologi pemanasan ini memiliki beberapa keunggulan seperti laju pemanasan yang lebih cepat, bersifat volumetrik, mencegah *overheating*, proses pemanasan yang lebih efisien dibandingkan pemanggangan konvensional. Pada penelitian sebelumnya, Hutasoit et al. (2021) menyatakan bahwa penggunaan enzim transglutaminase dengan pemanas ohmik pada roti berbahan tepung kacang kedelai hitam menghasilkan volume spesifik, tekstur, dan karakteristik sensori yang lebih baik. Hasil penelitian lain juga melaporkan hal yang sama, bahwa kelebihan pemanas ohmik dapat menghasilkan karakteristik mutu roti yang lebih baik dibandingkan pemanasan konvensional (Bender et al., 2019).

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pemanasan ohmik roti berbasis pati jagung yang dimodifikasi dengan enzim transglutaminase (TGase). Penggunaan jagung didasarkan pada ketersediaannya yang berlimpah dan umumnya digunakan sebagai bahan baku roti bebas gluten, kemudian kandungan pati diharapkan membentuk struktur adonan selama proofing (Brites et al., 2010; Ekpa et al., 2020). Selain itu juga ditambahkan tepung kedelai hitam sebagai sumber protein. Penambahan TGase dilakukan untuk memodifikasi protein bahan melalui ikatan silang kovalen yang dapat menyerupai sifat viskoelastik gluten (Manoj Kumar et al., 2019; Pongjaruvat et al., 2014; Sadowska et al., 2020). Teknologi enzim ini akan memiliki potensi dalam meningkatkan sifat viskoelastik adonan untuk secara efisien memperangkap dan memperangkap gelembung gas CO<sub>2</sub> hasil fermentasi sehingga volume pengembangan roti optimal. Selain itu, kombinasi penggunaan sistem pemanasan ohmik akan meminimalisir denaturasi protein selama pemanggangan sehingga volumenya lebih stabil sampai akhir pemanggangan.

Salah satu faktor utama yang mempengaruhi keberhasilan metode pemanasan ohmik adalah perubahan konduktivitas listriknya (Gally et al., 2016; Kanjanapongkul, 2017; Palaniappan et al., 1991). Selain itu, konduktivitas listrik biasanya sangat tergantung (Palaniappan et al., 1991) pada gradien tegangan yang diaplikasikan. Semakin besar tegangan yang diaplikasikan maka akan meningkatkan intensitas arus, konduktivitas listrik dan suhu yang dihasilkan (Khodeir et al., 2021; Norouzi et al., 2021). Berdasarkan uraian diatas maka perlu dikaji pengaruh konsentrasi TGase dan gradien tegangan pemanas ohmik terhadap karakteristik roti yang dihasilkan dan perubahan parameter prosesnya.

## Bahan dan metode

### *Bahan dan alat*

Bahan yang digunakan yaitu tepung maizena (Maizenaku, Egafood Co.Ltd., Indonesia), ragi kering (Fermipan, Lesaffre Co.Ltd., Indonesia), gula, garam, margarin, susu cair full cream (Diamond, Seratafoods Co.Ltd., Indonesia), telur, bubuk emulsifier (IBIS Blue, Lesaffre Co.Ltd., Indonesia), bubuk enzim transglutaminase (Prolink B-series, 100 U/g)), serta bubuk konjak glukomanan (Tepung Glukomanan Porangku) diperoleh pasar lokal Malang, Indonesia. Sedangkan tepung kedelai hitam diperoleh melalui beberapa proses penepungan melalui biji kacang kedelai hitam (Detam-1) dilakukan penyosohan menggunakan mesin sosoh kedelai (RH-PD 50, *dehulling miller*, China) yang dilengkapi dengan *cyclone*. Kemudian digiling menggunakan mesin penepung (YU8022, *dry miller*, China), serta diayak dengan ayakan 80 *mesh*. Tepung kedelai hitam yang dianalisis proksimat yang dinyatakan dalam persentase (berdasarkan basis kering) antara lain kadar air  $9,28 \pm 0,04$ , protein  $46,31 \pm 0,55$ , lemak  $19,91 \pm 0,04$ , abu  $5,22 \pm 0,03$ , karbohidrat  $19,28 \pm 0,58$  dan pati  $4,86 \pm 0,24$ .

Alat yang digunakan antara lain *mixer* (KLAZ Co.Ltd., Indonesia), oven (Getra, Inc. Japan), alat uji tekstur (CT3 Texture Analyser Brookfield Engineering Lab, Ins. dengan *software* TexturePro CT V1.4 Build 17), *color reader* (Minolta Inc. Japan), kamera digital (DSLR Canon EOS 600D), pemanas ohmik (Gambar 1) dan lain-lain.

### *Proses pembuatan adonan roti*

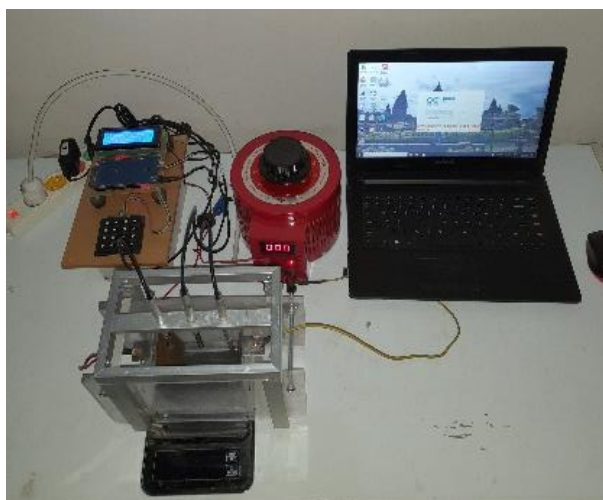
Formulasi adonan berbasis 100 g tepung (75 g pati maizena dan 25 g tepung kedelai hitam) yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari 25% gula, 3% ragi, 10% telur, 2% garam, 5% gel konjak glukomanan (dengan konsentrasi 0,2% b/b), 1,5% bubuk emulsifier, 3% margarin, 25% susu *full cream* cair. Sedangkan penambahan enzim TGase dilakukan sesuai rancangan percobaan dimana tahap 1 menggunakan 1%, sedangkan tahap 2 terdiri dari 6 level yaitu 0, 0,5, 1, 1,5, 2, dan 2,5%. Jumlah penambahan air sebesar 60% (*flour weight basis*, fw b) yang diperoleh pada percobaan pendahuluan untuk menghasilkan kualitas roti yang terbaik.

Untuk pembuatan adonan, ragi dan gula dilarutkan (60 mL air, 25 °C), dan diaktifkan dalam alat *proofer* selama 3 menit. Bahan lainnya dicampur menggunakan alat pencampur atau *mixer* yang dilengkapi dengan *hook whisk* dengan kecepatan 84 rpm selama 5 menit. Setelah bahan tercampur, kemudian adonan dimasukkan ke dalam cetakan yang telah diolesi mentega sebelumnya, kemudian ditutup dengan plastik *wrap*, dan dimasukan ke dalam *convection proofer* (35 °C, 40 menit).

Pemanggangan adonan roti dilakukan dengan 2 metode yaitu pemanggangan konvensional dan pemanasan ohmik. Pemanggangan dengan metode konvensional dilakukan menggunakan oven gas manual pada suhu 220 °C selama 40 menit. Dimensi cetakan adonan yang digunakan adalah 12 × 8 × 9 cm (P × L × T). Sedangkan pemanggangan dengan metode ohmik dilakukan sesuai dengan rancangan percobaan. Setelah dipanggang, roti didinginkan pada suhu kamar (26-28 °C) selama 3 jam dan dianalisis lebih lanjut.

### **Sistem pemanasan ohmik**

Gambar 1 menunjukkan sketsa alat pemanas roti dengan sistem ohmik. Peralatan terdiri dari cetakan yang terbuat dari bahan akrilik (panjang 19,5 cm, lebar 10 cm, dan tinggi 10 cm), dua elektroda *stainless steel* (8,5 × 9 cm) dengan ketebalan 25 mm, jarak pasang antara elektroda 12 cm pada cetakan, *power supply* (Takayosh, Japan), dan *data logger* yang dilengkapi dengan sensor arus dan suhu. Proses pemanasan dilakukan pada 7 gradien tegangan antara lain 5,83 V/cm (70 V), 6,66 V/cm (80 V), 7,50 V/cm (90 V), 8,33 V/cm (100 V), 9,16 V/cm (110 V), 10 V/Cm (120 V). Adonan dipanggang selama 30 menit pada setiap perlakuan. Roti dipisahkan dari sel ohmik dan didinginkan pada suhu kamar untuk analisis lebih lanjut setelah 3 jam.



**Gambar 1.** Rangkaian alat pemanas ohmik

### **Parameter penelitian**

#### **(1) Pengukuran suhu selama pemanasan ohmik**

Pengukuran suhu diperoleh menggunakan *data logger* yang dilengkapi dengan termokopel. Termokopel ditempatkan di tengah. Panas yang dihasilkan selama pemanasan ohmik diakibatkan oleh efek Joule, dampak disipasi energi elektrik menjadi panas (Khodeir et al., 2021):

$$Q = \sigma |\nabla V|^2$$

dimana  $|\nabla V|$  menyatakan modulus gradien potensial listrik, dan  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik yang bergantung pada suhu adonan.

#### **(2) Konduktivitas listrik**

Konduktivitas listrik ditentukan sesuai (Gally et al., 2016) :

$$\sigma = \frac{L \times I}{A \times V}$$

Dimana,  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik (S/m),  $I$  adalah arus listrik yang mengalir pada adonan ( $A$ ),  $V$  adalah tegangan listrik (Volt),  $A$  adalah luas permukaan kontak antara adonan dan elektroda ( $m^2$ ).

### **Aspek karakteristik roti**

#### **(1) Volume Spesifik**

Volume spesifik diperoleh menggunakan metode "*rapeseeds displacement*" yang diakui oleh AACC 55-50,01 (AACC, 2001). Modifikasi dilakukan pada penggantian rapeseed dengan biji selasih. Volume spesifik ( $cm^3/g$ ) ditentukan sebagai rasio perubahan volume dengan massa roti.

#### **(2) Baking loss**

*Baking loss* dikalkulasikan sesuai metode yang dilakukan (Turkut et al., 2016), yang bertujuan untuk mengevaluasi laju penguapan air yang dihasilkan selama proses pemanggangan.

$$Baking\ loss\ (\%) = \frac{W_{bb} - W_{ba}}{W_{bb}} \times 100$$

Dimana  $W_{bb}$  adalah massa awal adonan, dan  $W_{ba}$  adalah massa roti setelah dipanaskan.

#### **(3) Warna roti**

Penentuan uji warna dilakukan sesuai metode (Olojede et al., 2020). Parameter kecerahan ( $L^*$ ) dan merah ( $a^*$ ) dan kuning ( $b^*$ ) dilakukan sesuai *system colour* CIELAB menggunakan Chroma meter (Konica Minolta, Inc., Japan) yang dilengkapi dengan lampu pulsed xenon dan iluminant D65. Pengukuran dilakukan dalam rangkap tiga.

#### **(4) Profil tekstur crumb roti**

Parameter tekstur ditentukan menggunakan *analyser profil texture* (CT3 Texture Analyser Brookfield Engineering Lab, Ins) dengan *probe* tipe TA11/1000. Untuk analisis, roti diiris dengan *slicer* dengan ketebalan 20 mm. Pengujian dilakukan dengan uji dua kompresi menggunakan *probe* silinder 20 mm, kecepatan uji 1 mm/s, trigger load pada 6,8 g dan jarak kompresi 10 mm. Parameter reologi yang dianalisa adalah *hardness*, *springiness*, *cohesiveness*, *resilience* dan *chewiness*.

#### **(5) Porositas crumb**

Porositas *crumb* ditentukan menggunakan metode Bender et al. (2019). Untuk setiap formulasi, roti dipotong pada bagian tengah dan *crumb* pada sisi irisan difoto menggunakan kamera digital (DSLR Canon EOS 600D). Foto *crumb* dipotong menjadi 20x20 mm dalam ukuran dimensi sebenarnya dan diubah menjadi skala abu-abu 16-bit. Kemudian dilakukan analisis dengan menggunakan asumsi algoritma Otsu sebagai metode *threshold* untuk membedakan *gas-cell* dan *non-cell*. *Software* ini menggunakan kontras antara dua fase (bagian rongga dan padatan) untuk memperkirakan porositas. Ukuran rata-rata diameter pori, porositas (persentase luas total pori dengan luas total roti) dan densitas pori (total pori) ditentukan dengan menggunakan perangkat lunak.

### **Analisis statistik**

Analisis statistik pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak statistic (Minitab 17.0). ANOVA rancangan acak lengkap dilakukan, dan perbedaan paling signifikan pada tingkat probabilitas 5% (nilai  $p < 0,05$ ) digunakan untuk menyatakan perbedaan yang signifikan antara perlakuan secara statistik. Jika terdapat perbedaan yang signifikan maka dilanjutkan dengan uji lanjut *Tukey* ( $\alpha < 0,05$ ) pada masing-masing perlakuan.

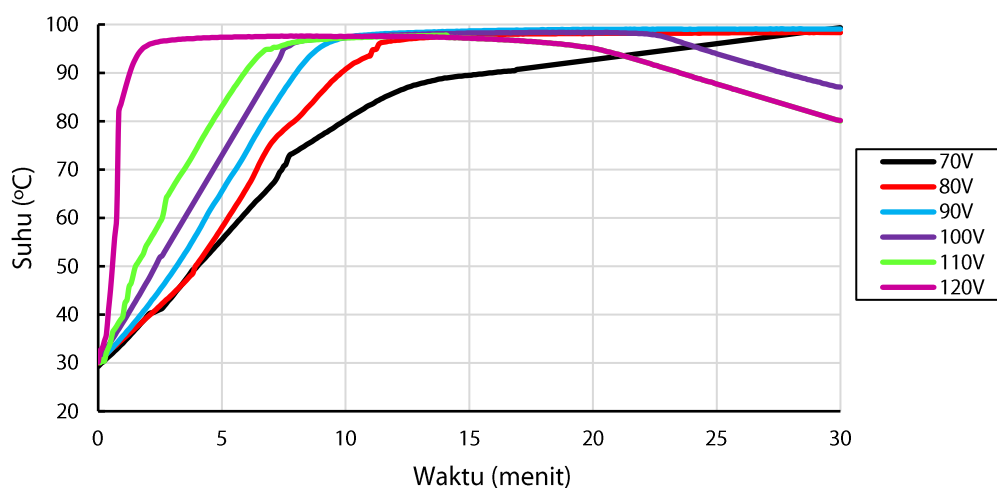


## Hasil dan pembahasan

### *Tahap 1: Pengaruh variasi tegangan terhadap karakteristik roti dan perubahan parameter prosesnya*

#### *Suhu*

Tingkat pemanasan bahan menentukan keberhasilan atau optimal pemanas ohmik untuk digunakan dalam pengolahan makanan. Durasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu optimal dari 33 menjadi 97 °C pada adonan roti ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan perhitungan, waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu 97 °C pada masing-masing perlakuan adalah 70 V (26 menit 5 detik), 80 V (12 menit 5 detik), 90 V (9 menit 25 detik), 100 V (7 menit 55 detik), 110 V (6 menit, 35 detik), 120 V (3 menit 5 detik). Disimpulkan bahwa gradien tegangan yang lebih tinggi menunjukkan waktu yang lebih cepat untuk mencapai suhu optimal. Semakin tinggi tegangan yang diaplikasikan maka semakin besar energi internal yang dihasilkan. Umumnya nilai arus yang dihasilkan sebanding dengan tegangan yang diberikan (Hukum Ohm). Hasil yang sama diperoleh oleh peneliti Darvishi et al. (2021), yang melaporkan bahwa ketika sampel diperlakukan tegangan yang lebih tinggi gradien, energi panas meningkatkan laju pemanasan.

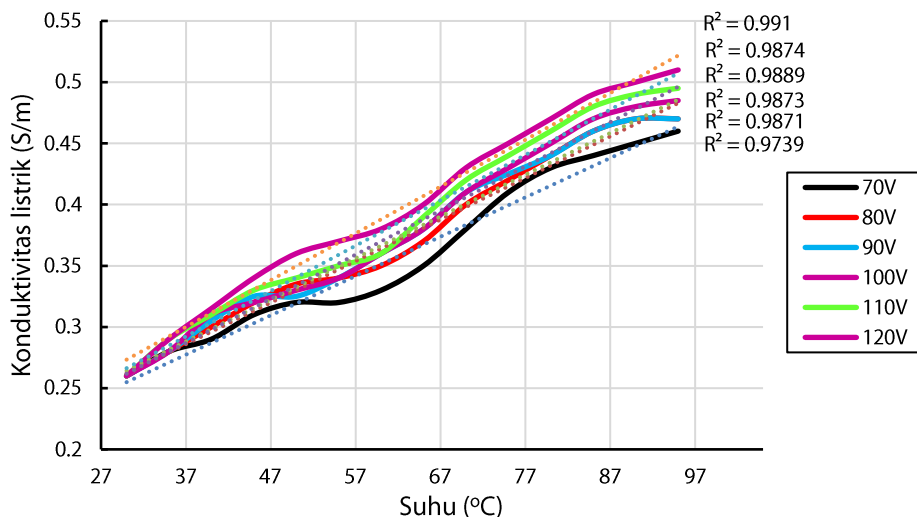


**Gambar 2.** Perubahan suhu selama proses pemanggangan ohmik dengan perlakuan tegangan yang berbeda

#### *Konduktivitas listrik*

Konduktivitas listrik adalah kemampuan suatu bahan atau zat untuk dapat menghantarkan arus listrik. Untuk memahami variasi konduktivitas listrik adonan, yang dipengaruhi oleh tingkat tegangan selama pemanggangan dengan perlakuan ohmik ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai konduktivitas listrik pada gradien tegangan bervariasi antara 0,25-0,46 S/m (70 V), 0,25-0,47 S/m (80 V), 0,26-0,47 S/m (90 V), 0,26-0,49 S/m (100 V), 0,26-0,50 S/m (110 V), 0,26-0,51 S/m (120 V). Hal ini menunjukkan bahwa nilai konduktivitas listrik meningkat secara linier dengan meningkatnya tegangan yang diaplikasikan. Selain itu, perubahan konduktivitas listrik juga sangat dipengaruhi sifat bahan dan perubahan suhu. Peneliti Khodeir et al. (2021) menyatakan bahwa panas internal yang dihasilkan oleh pemanasan ohmik kue sangat tergantung pada gradien tegangan yang diberikan, ketika adonan mengalami gelatinisasi pati akan menurunkan nilai konduktivitas listrik. Pada penelitian ini terjadi penurunan nilai konduktivitas listrik selama berlangsung pemanasan. Kandungan pati tepung maizena yang sangat tinggi menunjukkan pola perubahan kurva yang sama pada penelitian sebelumnya (Gally et al., 2016; Khodeir et al., 2021; Li et al., 2004), dimana terjadi peningkatan daya hantar listrik sebelum suhu gelatinisasi, kemudian menurun selama proses gelatinisasi, dan meningkat secara konstan setelahnya. Mereka menyimpulkan bahwa penurunan konduktivitas listrik disebabkan proses pembengkakan granula pati yang menghasilkan jarak antar partikel dan penurunan gaya tarik gesekan antara ion.

Semakin tinggi suhu, nilai konduktivitas listrik juga semakin tinggi. Apabila suhu semakin tinggi, maka ion-ion bergerak semakin cepat dan nilai konduktivitas listrik juga akan mengalami peningkatan. Pada penelitian ini perubahan konduktivitas listrik adonan meningkat secara linier dengan meningkatnya suhu (Gambar 3). Hasil ini seperti yang diharapkan dan mirip dengan literatur penelitian sebelumnya oleh (Derde et al., 2014; Gally et al., 2016; Hutasoit et al., 2021; Icier & Ilicali, 2005; Sabanci & Icier, 2017).



**Gambar 3.** Perubahan konduktivitas listrik sebagai fungsi pada suhu adonan vs. konduktivitas listrik selama proses pemanggangan ohmik pada tegangan yang berbeda.

### Evaluasi karakteristik roti

Volume spesifik merupakan parameter penting yang menggambarkan kualitas roti. Tabel 1 menunjukkan bahwa roti yang dipanaskan secara ohmik lebih baik dibandingkan dengan metode oven konvensional (kontrol). Volume spesifik roti yang dipanggang secara konvensional ( $2,05 \pm 0,04 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) menunjukkan nilai lebih rendah dibandingkan roti dengan pemanggangan ohmik ( $2,09 - 3,17 \text{ cm}^3/\text{g}$ ). Hal ini diduga karena perbedaan mekanisme distribusi panas yang terjadi, yang kemudian berdampak pada struktur mikro dan makro material. Pada pemanasan ohmik menghasilkan panas yang bersifat volumetrik dan laju yang cepat, sehingga menghasilkan proses pembengkakan *swelling* pada granula pati yang lebih maksimal. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Bender et al. (2019) melaporkan pemanasan ohmik menunjukkan volume roti yang lebih tinggi dan struktur roti yang stabil pada tahap awal pemanggangan sebelum  $\text{CO}_2$  dilepaskan selama proses pemanggangan.

**Tabel 1.** Nilai parameter volume spesifik, *baking loss* dan warna roti pada pemanggangan konvensional dan pemanasan ohmik dengan tegangan yang berbeda

Perlakuan	Volume spesifik ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	<i>Baking loss</i> (%)	Warna		
			L*	a*	b*
<i>Conventional</i>	$2,05 \pm 0,04^c$	$7,50 \pm 1,22$	$63,39 \pm 1,89^a$	$4,45 \pm 0,38$	$28,96 \pm 2,16$
70V	$2,09 \pm 0,07^c$	$8,69 \pm 1,80$	$59,39 \pm 8,13^{ab}$	$4,96 \pm 0,78$	$32,33 \pm 3,54$
80V	$2,33 \pm 0,12^{bc}$	$12,90 \pm 0,42$	$57,18 \pm 1,21^{ab}$	$5,06 \pm 0,92$	$30,49 \pm 1,55$
90V	$2,51 \pm 0,22^b$	$13,44 \pm 2,99$	$66,27 \pm 0,13^a$	$3,71 \pm 0,26$	$29,68 \pm 0,70$
100V	$2,88 \pm 0,06^a$	$13,58 \pm 0,24$	$64,22 \pm 1,20^a$	$3,73 \pm 0,05$	$27,92 \pm 0,65$
110V	$3,15 \pm 0,02^a$	$13,75 \pm 2,18$	$62,41 \pm 1,30^a$	$4,49 \pm 0,44$	$30,24 \pm 1,37$
120V	$3,17 \pm 0,17^a$	$14,58 \pm 1,50$	$50,97 \pm 3,27^b$	$4,37 \pm 0,26$	$32,64 \pm 0,93$

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang nyata pada taraf 5% menurut uji Tukey

Analisis *baking loss* bertujuan untuk mengevaluasi penurunan kadar air yang terjadi pada adonan selama proses pemanggangan. Pada Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai *baking loss* meningkat dengan meningkatnya tegangan listrik yang diaplikasikan. Biasanya semakin tinggi tegangan maka akan

menghasilkan densitas dan laju aliran elektron yang lebih tinggi sehingga menimbulkan gesekan antar elektron yang lebih tinggi pada internal bahan, yang selanjutnya berdampak pada energi panas dan keseragaman pemanasan yang dihasilkan. Hasil yang sama juga dilaporkan oleh Darvishi et al. (2015), bahwa peningkatan gradien yang lebih tinggi menghasilkan penurunan kadar air yang lebih tinggi pada buah tomat. Mereka mengaplikasikan gradien tegangan 6, 8, 19, 12, 14, 16 V/cm yang menunjukkan peningkatan suhu yang lebih cepat dan penurunan kadar yang lebih tinggi.

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, parameter warna kecerahan ( $L^*$ ), kemerahan ( $a^*$ ) dan kekuningan ( $b^*$ ) *crumb* roti dengan perlakuan tegangan tidak berbeda secara statistik. Hal ini dikarenakan kelebihan dari pemanasan ohmik yang dapat mencegah terjadinya *overheating* pada saat proses pemanasan sehingga tidak terjadi reaksi pencoklatan atau *maillard*. Akan tetapi, roti yang dipanggang secara konvensional memiliki nilai  $L^*$  *crust* yang lebih rendah yaitu  $52,33 \pm 1,26$  (tidak ditampilkan dalam tabel). Nilai  $L^*$  yang lebih rendah pada roti berhubungan dengan reaksi *maillard* di bagian luar adonan. Hal yang sama dilaporkan oleh Bender et al. (2019) bahwa perlakuan pemanggangan konvensional menunjukkan warna yang lebih gelap pada sisi *crust* roti akibat reaksi *maillard*.

Analisis profil tekstur (TPA) digunakan untuk mengetahui sifat fisik sampel terkait dengan ketahanan atau kekuatan sampel pada tekanan (kompresi diterapkan). Gradien tegangan berpengaruh nyata terhadap *hardness*, *springiness*, *cohesiveness*, *resilience*, dan *chewiness* *crumb* roti yang dihasilkan. Kekerasan merupakan indikator penting kualitas roti karena berhubungan langsung dengan penerimaan terhadap kelembutan dan kekerasan roti (Capriles & Arêas, 2014). Tabel 2 menunjukkan tren peningkatan level tegangan secara linier diikuti dengan peningkatan nilai kekerasan. Hal ini juga berkaitan dengan perbedaan *baking loss* yang dihasilkan (Onyango et al., 2011). Selain itu, nilai kekerasan yang tinggi juga berkaitan dengan nilai *cohesiveness*, *chewiness*, dan *resilience* (Pongjaruvat et al., 2014). Semakin tinggi nilai tegangan listrik yang diaplikasikan menunjukkan struktur roti yang semakin kohesif dan kompak. Disamping itu, nilai *hardness* dan *cohesiveness* roti dengan pemanggangan konvensional lebih rendah dibandingkan dengan pemanasan ohmik.

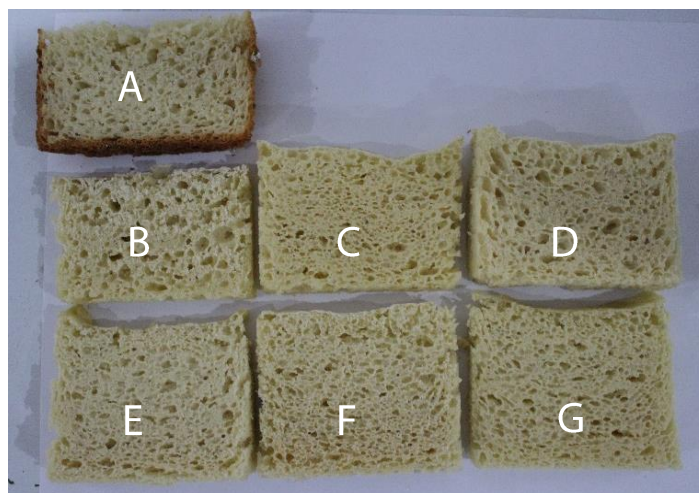
**Tabel 2.** Nilai parameter tekstur roti pada pemanggangan konvensional dan pemanasan ohmik dengan tegangan yang berbeda

Perlakuan	<i>Hardness</i> (N)	<i>Chewiness</i> (N)	<i>Resilience</i>	<i>Cohesiveness</i>	<i>Springiness</i>
<i>Conventional</i>	$3,08 \pm 0,46^b$	$0,05 \pm 0,02^{ab}$	$0,05 \pm 0,03^{ab}$	$0,26 \pm 0,04^{ab}$	$8,25 \pm 0,90^{ab}$
70 V	$3,01 \pm 0,04^b$	$0,03 \pm 0,00^b$	$0,03 \pm 0,02^b$	$0,21 \pm 0,04^b$	$7,02 \pm 0,55^b$
80 V	$3,22 \pm 0,15^{ab}$	$0,05 \pm 0,02^{ab}$	$0,05 \pm 0,03^{ab}$	$0,24 \pm 0,05^{ab}$	$7,79 \pm 0,09^{ab}$
90 V	$3,39 \pm 0,13^{ab}$	$0,05 \pm 0,01^{ab}$	$0,06 \pm 0,03^{ab}$	$0,24 \pm 0,05^{ab}$	$8,14 \pm 0,66^{ab}$
100 V	$3,50 \pm 0,14^{ab}$	$0,06 \pm 0,03^{ab}$	$0,07 \pm 0,02^{ab}$	$0,27 \pm 0,01^{ab}$	$8,89 \pm 0,65^a$
110 V	$3,58 \pm 0,08^a$	$0,08 \pm 1,02^a$	$0,07 \pm 0,02^a$	$0,29 \pm 0,02^a$	$8,05 \pm 0,41^{ab}$
120 V	$3,76 \pm 0,11^a$	$0,09 \pm 2,02^a$	$0,10 \pm 0,02^a$	$0,34 \pm 0,03^a$	$8,74 \pm 0,87^{ab}$

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang nyata pada taraf 5% menurut uji Tukey

Roti kedelai berkualitas tinggi ditandai dengan volume spesifik yang tinggi, yang disertai dengan berspons, berpori, dan sel homogen (Puerta et al., 2021). Sel pori seragam yang lebih halus dan berdinding tipis menghasilkan tekstur yang lebih lembut dan lebih elastis daripada struktur sel yang kasar dan berdinding tebal. Perlakuan tegangan yang diberikan berpengaruh signifikan terhadap densitas, ukuran, dan persentase porositas *crumb* roti (Tabel 3, Gambar 4). Tabel 3 secara umum menunjukkan bahwa semakin tinggi tegangan menyebabkan peningkatan kerapatan pori. Sebaliknya, ukuran rata-rata dan persentase pori-pori menjadi lebih kecil. Selain itu, densitas sel, ukuran sel, dan porositas roti dengan pemanggangan konvensional memiliki nilai terendah, yang menunjukkan rendahnya volume pengembangan yang dihasilkan. Puerta et al. (2021) melaporkan bahwa rendahnya nilai ukuran pori dan porositas akan menurunkan volume pengembangan roti.





**Gambar 4.** Penampakan irisan roti dengan perlakuan (A) pemanggangan konvensional dan pemanasan ohmik pada tegangan (B) 70 V, (C) 80 V, (D) 90 V, (E) 100 V, (F) 110 V, dan (G) 120 V

**Tabel 3.** Nilai parameter porositas roti pada pemanggangan konvensional dan pemanasn ohmik dengan tegangan yang berbeda

Parameter	Densitas pori (cell/mm)	Ukuran rata-rata pori (mm <sup>2</sup> )	Porositas (%)
<i>Conventional</i>	30 ± 2,52 <sup>c</sup>	3,88 ± 0,22 <sup>ab</sup>	29,31 ± 0,85 <sup>c</sup>
70V	30 ± 7,57 <sup>c</sup>	5,41 ± 1,59 <sup>a</sup>	39,09 ± 4,06 <sup>ab</sup>
80V	59 ± 3,51 <sup>b</sup>	2,31 ± 0,22 <sup>bc</sup>	33,71 ± 1,25 <sup>bc</sup>
90V	32 ± 5,29 <sup>c</sup>	4,23 ± 0,38 <sup>ab</sup>	33,51 ± 3,87 <sup>bc</sup>
100V	37 ± 2,00 <sup>c</sup>	3,48 ± 0,25 <sup>abc</sup>	32,10 ± 0,65 <sup>bc</sup>
110V	40 ± 5,77 <sup>c</sup>	4,49 ± 1,12 <sup>a</sup>	43,48 ± 3,95 <sup>a</sup>
120V	84 ± 2,52 <sup>a</sup>	1,66 ± 0,06 <sup>c</sup>	34,63 ± 2,26 <sup>bc</sup>

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang nyata pada taraf 5% menurut uji Tukey

#### **Tahap 2: Pengaruh konsentrasi TGase terhadap karakteristik roti**

Nilai volume pengembangan spesifik roti dengan perlakuan tanpa penambahan TGase berbeda nyata dengan perlakuan TGase (Tabel 4). Semakin tinggi konsentrasi enzim TGase yang diaplikasikan menunjukkan peningkatan volume spesifik roti yang dihasilkan. Roti dengan perlakuan tanpa penambahan TGase memiliki volume pengembangan spesifik terendah secara keseluruhan yaitu  $2,84 \pm 0,20$ . Hal ini disebabkan ketiadaan TGase untuk menghasilkan jejaring protein dalam membentuk struktur adonan. TGase berperan dalam pembentukan jejaring protein pada adonan yang disebabkan reaksi ikatan antara asam glutamin dan lisin yang terdapat dalam tepung kedelai hitam (Yasir et al., 2007; Dłuzewska et al., 2015). Sehingga dalam penelitian ini, polimer protein yang dihasilkan reaksi TGase akan membuat adonan lebih elastis sehingga mampu menahan gas lebih maksimal. Roti dengan penambahan TGase 1.5% menghasilkan volume pengembangan yang tertinggi. Hasil yang sama juga ditemukan (Mohammadi et al., 2015; Pongjaruvat et al., 2014; Sakr & Liu, 2014; Wulandari et al., 2022) bahwa penambahan TGase menunjukkan peningkatan volume spesifik roti.

Nilai *baking loss* roti tanpa penambahan TGase menunjukkan persentase lebih rendah dibandingkan perlakuan lainnya. Nilai *baking loss* roti dengan perlakuan penambahan TGase yang berbeda tidak berbeda nyata. Hal ini disebabkan pengaruh penambahan TGase yang berperan sebagai pengikat silang antar protein dalam bahan dapat meningkatkan kapasitas pengikatan air pada adonan. Pada reaksi ikatan silang, TGase dapat bereaksi mengikat air, menghasilkan deamidasi protein (Chinma et al., 2013; Wang et al., 2010). Hasil yang sama juga dilaporkan dalam penelitian Kuraishi et al. (1996), penambahan TGase dapat meningkatkan kemampuan pengikatan air oleh protein kedelai.

**Tabel 4.** Nilai parameter volume spesifik, *baking loss* dan warna roti dengan perlakuan penambahan konsentrasi enzim TGase yang berbeda

Perlakuan	Volume spesifik (cm <sup>3</sup> /g)	<i>Baking loss</i> (%)	Warna		
			L*	a*	b*
0%	2,84 ± 0,20 <sup>b</sup>	14,83 ± 4,59	63,02 ± 5,28 <sup>ab</sup>	3,92 ± 0,13	29,09 ± 0,41
0,5%	3,01 ± 0,15 <sup>ab</sup>	13,83 ± 1,94	61,23 ± 4,29 <sup>ab</sup>	4,04 ± 0,21	29,41 ± 0,22
1%	3,17 ± 0,17 <sup>ab</sup>	13,75 ± 2,18	57,81 ± 1,209 <sup>b</sup>	5,06 ± 0,92	30,49 ± 1,55
1,5%	3,36 ± 0,17 <sup>a</sup>	12,83 ± 3,38	62,99 ± 3,23 <sup>ab</sup>	4,03 ± 0,06	29,35 ± 1,04
2%	3,32 ± 0,15 <sup>ab</sup>	13,28 ± 5,26	63,79 ± 5,58 <sup>ab</sup>	4,38 ± 0,58	29,58 ± 3,50
2,5%	3,12 ± 0,21 <sup>ab</sup>	10,4 ± 4,61	68,613 ± 1,129 <sup>a</sup>	4,28 ± 0,85	28,72 ± 3,48

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang nyata pada taraf 5% menurut uji Tukey

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5, parameter warna L\*, a\* dan b\* *crumb* roti dengan perlakuan penambahan enzim TGase tidak berbeda secara statistik. Hal ini disebabkan oleh penggunaan tegangan yang sama yaitu 120V sehingga tidak terjadi perubahan warna yang signifikan. Kelebihan dari pemanasan ohmik yang dapat mencegah terjadinya overheating pada saat proses pemanasan akan meminimalisir perubahan warna.

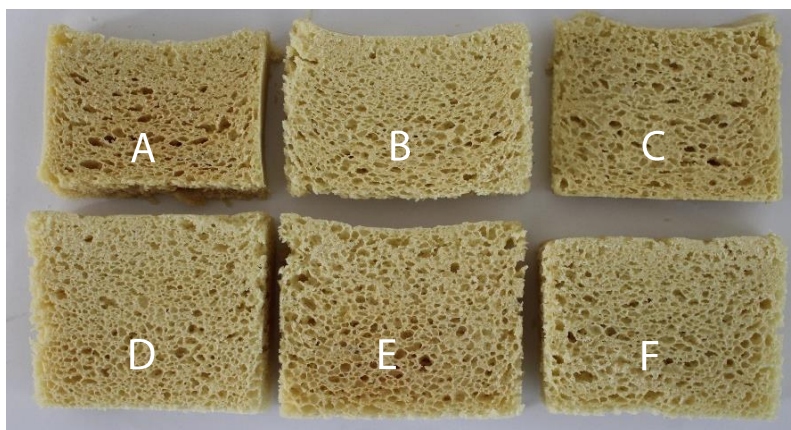
**Tabel 5.** Nilai parameter tekstur roti dengan perlakuan penambahan konsentrasi enzim TGase yang berbeda

Perlakuan	<i>Hardness</i> (N)	<i>Chewiness</i> (N)	<i>Resilience</i>	<i>Cohesiveness</i>	<i>Springiness</i>
0%	2,90 ± 0,56 <sup>b</sup>	0,05 ± 0,02 <sup>b</sup>	0,03 ± 0,02 <sup>c</sup>	0,19 ± 0,03 <sup>b</sup>	7,99 ± 0,56 <sup>b</sup>
0,5%	3,19 ± 0,81 <sup>ab</sup>	0,06 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,04 ± 0,01 <sup>bc</sup>	0,20 ± 0,03 <sup>b</sup>	8,04 ± 0,31 <sup>b</sup>
1%	3,76 ± 0,11 <sup>ab</sup>	0,09 ± 0,02 <sup>ab</sup>	0,10 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,34 ± 0,03 <sup>a</sup>	9,12 ± 0,44 <sup>ab</sup>
1,5%	4,32 ± 0,67 <sup>ab</sup>	0,10 ± 0,02 <sup>ab</sup>	0,08 ± 0,02 <sup>abc</sup>	0,29 ± 0,08 <sup>ab</sup>	8,72 ± 0,16 <sup>ab</sup>
2%	4,09 ± 1,04 <sup>ab</sup>	0,11 ± 0,03 <sup>ab</sup>	0,08 ± 0,03 <sup>ab</sup>	0,35 ± 0,02 <sup>a</sup>	8,70 ± 0,58 <sup>ab</sup>
2,5%	5,27 ± 1,12 <sup>a</sup>	0,12 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,08 ± 0,01 <sup>ab</sup>	0,36 ± 0,03 <sup>a</sup>	9,39 ± 0,47 <sup>a</sup>

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang nyata pada taraf 5% menurut uji Tukey

Tabel 5 menunjukkan nilai tekstur *crumb* roti dengan perlakuan tanpa TGase berbeda nyata dengan perlakuan TGase. Secara keseluruhan, semakin tinggi penambahan TGase yang diaplikasikan menunjukkan peningkatan nilai *hardness*, *chewiness*, *resilience*, *cohesiveness* dan *springiness* roti yang linear. Nilai ini mengindikasikan adanya pengaruh konsentrasi enzim TGase. Tidak adanya TGase sebagai pengikat silang akan mengakibatkan terbatasnya pemerangkapan gas selama fermentasi. Hasil yang sama juga ditemukan pada penelitian oleh Pongjaruvat et al. (2014) pada roti berbahan tepung beras dengan penambahan TGase. Selain itu, biasanya volume spesifik berbanding terbalik dengan tekstur *crumb* roti, dimana roti dengan pengembangan volume yang lebih tinggi memiliki tekstur *crumb* yang lebih lembut (He & Hosene, 1990). Hasil yang sama juga ditemukan pada penelitian Storck et al. (2013), bahwa nilai kohesivitas roti berbasis tepung beras lebih tinggi dibandingkan tanpa penambahan TGase. Ketiadaan *cross-linking* oleh TGase juga sangat mempengaruhi nilai *springiness*. Hasil yang sama juga dilaporkan oleh Hera et al. (2014) bahwa kadar air yang tinggi menunjukkan nilai *springiness* yang tinggi pada tepung roti berbasis tepung beras.

Analisis *image* pada irisan *crumb* roti menunjukkan bahwa konsentrasi TGase berpengaruh sangat nyata terhadap densitas pori, ukuran pori dan porositas (Gambar 5). Tabel 6 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi enzim TGase (dari 0 – 2,5%) mengakibatkan perbedaan porositas sel pori roti. Hal ini mengindikasikan kenaikan volume pengembangan dan tekstur yang dihasilkan. Hasil yang sama juga telah dilaporkan oleh Pongjaruvat et al. (2014) pada pembuatan roti bebas gluten berbahan tepung beras. Roti dengan volume pengembangan yang tinggi biasanya menampilkan densitas dan persentase porositas lebih tinggi.



**Gambar 5.** Penampakan irisan roti dengan perlakuan penambahan konsentrasi enzim TGase (A) 0%, (B) 0,5%, (C) 1%, (D) 1,5%, (E) 2%, dan (F) 2,5%

Analisis *image* pada irisan *crumb* roti menunjukkan bahwa konsentrasi TGase berpengaruh sangat nyata terhadap densitas pori, ukuran pori dan porositas (Gambar 5). Tabel 6 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi enzim TGase (dari 0 – 2,5%) mengakibatkan perbedaan porositas sel pori roti. Hal ini mengindikasikan kenaikan volume pengembangan dan tekstur yang dihasilkan. Hasil yang sama juga telah dilaporkan oleh Pongjaruvat et al. (2014) pada pembuatan roti bebas gluten berbahan tepung beras. Roti dengan volume pengembangan yang tinggi biasanya menampilkan densitas dan persentase porositas lebih tinggi.

**Tabel 6.** Nilai parameter porositas roti dengan perlakuan penambahan konsentrasi enzim TGase yang berbeda

Parameter	Densitas pori (cell/mm)	Ukuran rata-rata pori (mm <sup>2</sup> )	Porositas (%)
0%	64,67 ± 2,52 <sup>bc</sup>	2,21 ± 0,17 <sup>bc</sup>	35,61 ± 1,43 <sup>c</sup>
0,5%	78,67 ± 7,23 <sup>ab</sup>	2,12 ± 0,22 <sup>bc</sup>	41,41 ± 0,84 <sup>ab</sup>
1%	83,67 ± 2,52 <sup>a</sup>	1,66 ± 0,06 <sup>c</sup>	34,63 ± 2,26 <sup>c</sup>
1,5%	73 ± 8,19 <sup>abc</sup>	2,45 ± 0,31 <sup>ab</sup>	44,29 ± 1,22 <sup>a</sup>
2%	58,33 ± 6,11 <sup>c</sup>	2,90 ± 0,22 <sup>a</sup>	42,18 ± 3,68 <sup>ab</sup>
2,5%	63,33 ± 4,04 <sup>c</sup>	2,43 ± 0,27 <sup>ab</sup>	38,34 ± 1,79 <sup>bc</sup>

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang nyata pada taraf 5% menurut uji Tukey

## Kesimpulan

Studi ini menyimpulkan bahwa pemanasan ohmik menunjukkan beberapa keunggulan dibandingkan pemanggangan konvensional. Dibandingkan dengan metode konvensional, roti panggang dengan pemanasan ohmik memiliki volume pengembangan, tekstur, porositas, dan warna yang lebih baik. Nilai volume spesifik roti yang dipanggang secara konvensional ( $2,05 \pm 0,04$  cm<sup>3</sup>/g) lebih rendah dibandingkan dengan roti panggang yang dipanaskan secara ohmik ( $2,09$ - $3,17$  cm<sup>3</sup>/g). Berdasarkan evaluasi karakteristik roti yang dihasilkan, didapatkan bahwa perlakuan gradien tegangan (120 V) merupakan perlakuan terbaik. Ini menunjukkan volume spesifik  $3,17 \pm 0,17$  cm<sup>3</sup>/g, *baking loss*  $14,58 \pm 1,50\%$ , kecerahan  $50,97 \pm 3,27$ , *hardness*  $3,76 \pm 0,11$ , *cohesiveness*  $0,34 \pm 0,03$ , dan densitas pori  $84 \pm 2,52$ . Berdasarkan parameter proses, diketahui bahwa ketika adonan dipanggang dengan level tegangan yang lebih tinggi menunjukkan laju peningkatan suhu dan konduktivitas listrik, Ini juga meningkatkan laju penguapan air atau menurunkan kadar air lebih cepat. Perlakuan tegangan 120 V menunjukkan waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu maksimum 97 °C selama 3 menit 5 detik, dan nilai konduktivitas listrik 0,26-0,51 S/m.

Berdasarkan perlakuan enzim TGase diperoleh bahwa ketika adonan roti diterapkan dengan konsentrasi enzim TGase yang lebih tinggi, maka secara linear mempengaruhi nilai volume spesifik, nilai *hardness*, *chewiness*, *resilience*, *cohesiveness*, *springiness*, ukuran rata-rata pori, dan porositas pori roti

yang dihasilkan. Nilai volume spesifik roti dan densitas pori-pori tertinggi diperoleh pada perlakuan TGase 1,5%. Sehingga konsentrasi TGase 1,5% layak direkomendasikan untuk diaplikasikan dalam pembuatan roti.

## Ucapan terima kasih

Ucapan terimakasih secara khusus disampaikan kepada Direktorat Riset, Teknologi dan dan Pengabdian kepada Masyarakat, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Riset dan Teknologi atas dana yang diberikan melalui skema hibah dosen pemula.

## Daftar pustaka

- AACC, I. (2001). 10-05.01 Guidelines for measurement of volume by rapeseed displacement. In AACC *Approved Methods of Analysis*. Cereals & Grains Association. <https://doi.org/10.1094/AACCIntMethod-10-05.01>
- 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. *Food and Bioprocess Technology*, 12, 1603–1613. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02324-9>
- Bender, D., & Schönlechner, R. (2020). Innovative approaches towards improved gluten-free bread properties. *Journal of Cereal Science*, 91, 102904. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102904>
- Brites, C., Trigo, M. J., Santos, C., Collar, C., & Rosell, C. M. (2010). Maize-based gluten-free bread: Influence of processing parameters on sensory and instrumental quality. *Food and Bioprocess Technology*, 3(5), 707–715. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0108-4>
- Capriles, V. D., & Arêas, J. A. G. (2014). Novel approaches in gluten-free breadmaking: Interface between food science, nutrition, and health. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(5), 871–890. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12091>
- Chinma, C. E., Aiahu, C. C., & Abu, J. O. (2013). Chemical composition, functional and pasting properties of cassava starch and soy protein concentrate blends. *Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1179–1185. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0451-8>
- da Rosa Machado, C., & Thys, R. C. S. (2019). Cricket powder (*Gryllus assimilis*) as a new alternative protein source for gluten-free breads. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 56, 102180. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102180>
- Darvishi, H., Ghiasi, F., Rostami, N., & Fadavi, A. (2021). Effect of ohmic heating on electrochemical-thermal parameters and inactivation of *Escherichia coli* of well water drinkable. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102786. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2021.102786>
- Darvishi, H., Hosainpour, A., Nargesi, F., & Fadavi, A. (2015). Exergy and energy analyses of liquid food in an Ohmic heating process: A case study of tomato production. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 31, 73–82. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2015.06.012>
- Derde, L. J., Gomand, S. V., Courtin, C. M., & Delcour, J. A. (2014). Moisture distribution during conventional or electrical resistance oven baking of bread dough and subsequent storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(27), 6445–6453. <https://doi.org/10.1021/jf501856s>
- Dłuzewska, E., Marciniak-Lukasiak, K., & Kurek, N. (2015). Effect of transglutaminase additive on the quality of gluten-free bread. *CyTA - Journal of Food*, 13(1), 80–86. <https://doi.org/10.1080/19476337.2014.917336>
- Ekpa, O., Palacios-Rojas, N., Rosales, A., Renzetti, S., Fogliano, V., & Linnemann, A. R. (2020). Genotype selection influences the quality of gluten-free bread from maize. *LWT*, 125, 109214. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109214>



- Gally, T., Rouaud, O., Jury, V., & Le-Bail, A. (2016). Bread baking using ohmic heating technology; a comprehensive study based on experiments and modelling. *Journal of Food Engineering*, 190, 176-184. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.06.029>
- Gao, J., Gu, F., Abdella, N. H., Ruan, H., & He, G. (2012). Investigation on culturable microflora in Tibetan kefir grains from different areas of China. *Journal of Food Science*, 77(8), M425-M433. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02805.x>
- Gusmão, T. A. S., de Gusmão, R. P., Moura, H. V., Silva, H. A., Cavalcanti-Mata, M. E. R. M., & Duarte, M. E. M. (2019). Production of prebiotic gluten-free bread with red rice flour and different microbial transglutaminase concentrations: modeling, sensory and multivariate data analysis. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 2949-2958. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03769-8>
- He, H., & Hosene, R. C. (1990). Changes in bread firmness and moisture during long-term storage. *Cereal Chemistry*, 67(6), 603-605. [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1990/Documents/67\\_603.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1990/Documents/67_603.pdf)
- Hera, E., Rosell, C. M., & Gomez, M. (2014). Effect of water content and flour particle size on gluten-free bread quality and digestibility. *Food Chemistry*, 151, 526-531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.115>
- Hutasoit, J. P., Sutrisno, A., Murtini, E. S., & Lastryanto, A. (2021). The effect of transglutaminase on gluten-free soy bread baked using ohmic heating. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 924, 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/924/1/012041>
- Icier, F., & Ilcali, C. (2005). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*, 38(10), 1135-1142. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.04.003>
- 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>
- Khodeir, M., Rouaud, O., Ogé, A., Jury, V., Le-Bail, P., & Le-Bail, A. (2021). Study of continuous cake pre-baking in a rectangular channel using ohmic heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 67, 102580. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102580>
- Kuraishi, C., Sakamoto, J., & Soeda, T. (1996). The usefulness of transglutaminase for food processing. *ACS Symposium Series*, 637, 29-38. <https://doi.org/10.1021/bk-1996-0637.ch003>
- 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), 113-120. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00199-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00199-7)
- Manoj Kumar, C. T., Sabikhi, L., Singh, A. K., Raju, P. N., Kumar, R., & Sharma, R. (2019). Effect of incorporation of sodium caseinate, whey protein concentrate and transglutaminase on the properties of depigmented pearl millet based gluten free pasta. *LWT*, 103, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.071>
- Mohammadi, M., Azizi, M. H., Neyestani, T. R., Hosseini, H., & Mortazavian, A. M. (2015). Development of gluten-free bread using guar gum and transglutaminase. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 1398-1402. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.013>
- 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, 110242. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110242>
- Olojede, A. O., Sanni, A. I., & Banwo, K. (2020). Effect of legume addition on the physiochemical and sensorial attributes of sorghum-based sourdough bread. *LWT*, 118, 108769. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108769>
- Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G., & Lindhauer, M. G. (2011). Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch. *LWT - Food Science and Technology*, 44(3), 681-686. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.09.006>



- Palaniappan, Sevugan Sastry, S. K. (1991). Electrical conductivity of selected juices: influences of temperature, solids content, applied voltage, and particle size. *Journal of Food Process Engineering*, 14(4), 247-260. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1991.tb00135.x>
- 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*, 36, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.09.004>
- Puerta, P., Garzón, R., Rosell, C. M., Fiszman, S., Laguna, L., & Tárrega, A. (2021). Modifying gluten-free bread's structure using different baking conditions: Impact on oral processing and texture perception. *LWT*, 140, 110718. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110718>
- Sabanci, 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>
- Sadowska, A., & Diowks, A. (2020). Effect of transglutaminase on specific volume and crumb porosity of gluten-free buckwheat bread. *Zywnosc. Nauka. Technologia. Jakosc/Food. Science Technology. Quality*, 27(1), 74-84. <https://doi.org/10.15193/zntj/2020/122/323>
- Sakr, M., & Liu, S. (2014). A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 262-269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.061>
- Storck, C. R., da Rosa Zavareze, E., Gularte, M. A., Elias, M. C., Rosell, C. M., & Guerra Dias, A. R. (2013). Protein enrichment and its effects on gluten-free bread characteristics. *LWT - Food Science and Technology*, 53(1), 346-354. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.02.005>
- Turkut, G. M., Cakmak, H., Kumcuoglu, S., & Tavman, S. (2016). Effect of quinoa flour on gluten-free bread batter rheology and bread quality. *Journal of Cereal Science*, 69, 174-181. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.03.005>
- Wang, L., Xie, B., Shi, J., Xue, S., Deng, Q., Wei, Y., & Tian, B. (2010). Physicochemical properties and structure of starches from Chinese rice cultivars. *Food Hydrocolloids*, 24(2-3), 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.09.007>
- 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*, 11(14), 6567. <https://doi.org/10.3390/app11146567>
- Wieser, H. (2007). Chemistry of gluten proteins. *Food Microbiology*, 24(2), 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.07.004>
- Wulandari, E., Ishmayana, S., Marta, H., Fadhlillah, M., & Isnaeni, N. F. (2022). Optimasi bubuk bunga telang, enzim transglutaminase, dan bread improver untuk meningkatkan fungsionalitas dan kualitas roti manis [Optimizing the butterfly pea powder, transglutaminase enzyme, and bread improver to improve the functionality and quality of sweet bread]. *Jurnal Teknologi & Industri Hasil Pertanian*, 27(2), 108-117. <https://doi.org/10.23960/jtihp.v27i2.108-117>
- Khakollari, V., Canavari, M., & Osman, M. (2019). Factors affecting consumers' adherence to gluten-free diet, a systematic review. *Trends in Food Science and Technology*, 85, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.005>
- Yasir, S. B. M., Sutton, K. H., Newberry, M. P., Andrews, N. R., & Gerrard, J. A. (2007). The impact of transglutaminase on soy proteins and tofu texture. *Food Chemistry*, 104(4), 1491-1501. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.02.026>