

**PENGARUH KOMBINASI *Lactiplantibacillus plantarum* DAN *Saccharomyces cerevisiae*
TERHADAP NILAI *estimated Glycemic Index* (eGI) SECARA *In Vitro* DAN
KUALITAS ROTI GANDUM HITAM**

SKRIPSI

**Oleh:
AISATUNNADIYA KOMALA MURSYID
NIM. 220602110127**



**PROGRAM STUDI BIOLOGI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**PENGARUH KOMBINASI *Lactiplantibacillus plantarum* DAN *Saccharomyces cerevisiae*
TERHADAP NILAI *estimated Glycemic Index* (eGI) SECARA *In Vitro* DAN
KUALITAS ROTI GANDUM HITAM**

SKRIPSI

**Oleh:
AISATUNNADIYA KOMALA MURSYID
NIM. 220602110127**

**diajukan Kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri (UIN) Malang
untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**PROGRAM STUDI BIOLOGI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

BAB I

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Aisatunnadiya Komala Mursyid
NIM : 220602110127
Program Studi : Biologi
Judul Penelitian : PENGARUH KOMBINASI
Lactiplantibacillus plantarum DAN *Saccharomyces cerevisiae* TERHADAP NILAI *estimated Glycemic Index* (eGI) SECARA *In Vitro* DAN KUALITAS ROTI GANDUM HITAM

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan penguji pada tanggal 11 Juni 2026 dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Dr. Ulfah Utami, M.Si
NIP. 19650509 199903 2 002

Pembimbing II : Prof. Dr. Ahmad Barizi, M.A
NIP. 197312121998031008

Tim Penguji : Ir. Liliek Hariane, A.R., M.P
NIP. 196209011998032001

: Prilya Dewi Fitriyani, M.Sc
NIP. 199004282023212037

(.....)

(.....)

(Ketua) (.....)

(Anggota) (.....)



Ketua Program Studi Biologi

Prof. Dr. Retno Susilowati, M.Si
NIP. 19671113 199402 2 001

HALAMAN PERSEMBAHAN

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah serta ridhonya kepada penulis untuk bisa menyelesaikan naskah skripsi ini, yang berjudul “Pengaruh Kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccharomyces cerevisiae* Terhadap Nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) Secara *In Vitro* dan Kualitas Roti Gandum Hitam” yang dapat terselesaikan dengan tepat waktu dan baik. Sholawat serta Salam yang senantiasa kami curahkan kepada baginda Nabi Muhammad SAW, suri teladan yang baik yang telah membawa umatnya dari zaman kegelapan dan menuju jalan yang terang benderang yang penuh dengan ilmu dan kebaikan.

Skripsi ini saya persembahkan sebagai wujud rasa terimakasih, rasa cinta, bahagia dan penghargaan yang tulus kepada semua pihak yang telah hadir mendukung dan memberi arti di setiap perjalanan yang berharga ini. *Bismillahirrahmanirrahim*, dengan kerendahan hati dan penuh rasa syukur, penulis mempersembahkan skripsi ini kepada :

1. Kedua orang tua tercinta, Ayah Mursyidin dan Ibu Siti Musyarofah. Terima kasih atas cinta, kasih sayang, doa, pengorbanan, serta dukungan yang tidak pernah putus untuk penulis. Terima kasih telah menjadi tempat pulang ternyaman, pendengar terbaik di setiap keluh kesah, dan alasan terbesar bagi penulis untuk terus berjuang hingga mampu menyelesaikan pendidikan ini. Semoga keberhasilan kecil ini menjadi bentuk bakti dan kebanggaan untuk Ayah dan Ibu.
2. Adik tersayang, Muhammad Fauzan Aji Ramadhan. Terima kasih atas doa, dukungan, keceriaan, dan perhatian yang selalu diberikan. Semoga pencapaian ini dapat menjadi motivasi untuk terus berjuang meraih cita-cita serta membahagiakan Ayah dan Ibu.
3. Dosen Pembimbing, Prof. Dr. Hj. Ulfah Utami, M.Si. dan Prof. Dr. Ahmad Barizi, M.A. Terima kasih atas bimbingan, arahan, ilmu, motivasi, serta kesabaran yang diberikan selama proses penyusunan skripsi ini. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan menjadi amal yang bernilai pahala.
4. Guru-guru yang telah membimbing penulis dalam menuntut ilmu agama, yaitu Abah Hasan dan Bunyai Hamidah, Abah dan Ummik, Ummah dan Buya, serta Ustadz Zein dan Ustadzah Linda. Terima kasih atas ilmu, nasihat, doa, dan teladan yang telah diberikan. Semoga setiap ilmu yang diajarkan menjadi amal jariyah yang terus mengalir dan membawa keberkahan bagi kehidupan penulis.
5. Para Musyrifah dan seluruh keluarga besar Daruzzahra Arrifa'i yang telah menjadi rumah kedua bagi penulis untuk belajar, bertumbuh, dan mengukir banyak kenangan berharga selama di pesantren. Terima kasih juga kepada keluarga Daruzzahra_22 dan sahabat seperjuangan atas doa, dukungan, kebersamaan, serta semangat yang selalu diberikan hingga penulis mampu sampai pada tahap ini.
6. Teman seprjuangan penulis Nur Zahrotul Fatimah, Putri Setyowati, dan Aidah Alya Mufidah. Terimakasih atas dukungan, bantuan dan

kebersamaan selama proses penelitian dan memberikan perhatian penuh sehingga saya dapat sampai pada titik ini.

7. Teman-teman satu proyek penelitian yang telah menjadi rekan terbaik selama proses penelitian. Terima kasih atas kerja sama, bantuan, diskusi, dan dukungan yang diberikan hingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.
8. Sahabat dan orang-orang baik yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. Terima kasih telah hadir, mendukung, menguatkan, serta menemani berbagai proses kehidupan penulis hingga saat ini.
9. Teman-teman Biologi Angkatan 2022 (*Raventalizm*). Terima kasih atas kebersamaan, pengalaman, serta perjuangan yang telah kita lalui bersama dalam suka maupun duka selama menempuh pendidikan.
10. Terakhir, untuk diri saya sendiri. Terima kasih karena telah bertahan, bangkit, dan terus berjuang meskipun sering dihadapkan pada rasa lelah, ragu, dan berbagai tantangan. Skripsi ini menjadi bukti bahwa setiap proses yang dijalani dengan sabar dan sungguh-sungguh akan mengantarkan pada tujuan yang diharapkan.

Semoga segala doa, dukungan, bantuan, dan kebaikan yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan terbaik dari Allah SWT. Aamiin Ya Rabbal 'Alamin.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

MOTTO

*"Karena sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan."
(QS. Al-Insyirah: 6)*

*"Tidak semua yang diusahakan akan sesuai dengan yang diinginkan, tetapi
semua yang Allah tetapkan akan selalu menjadi yang terbaik"
— Motto Penulis*

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Aisatunnadiya Komala Mursyid
NIM : 220602110127
Program Studi : Biologi
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : Pengaruh Kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccharomyces cerevisiae* Terhadap Nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) secara *In Vitro* dan Kualitas Roti Gandum Hitam

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambilan data, tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada lembar pustaka. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi akademik maupun hukum atas perbuatan tersebut.

Malang, 11 Juni 2026
Yang membuat pernyataan,



Aisatunnadiya Komala Mursyid
NIM. 220602110127

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasikan namun terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Daftar Pustaka diperkenankan untuk dicatat, tetapi pengutipan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai kebiasaan ilmiah untuk menyebutkannya.

**PENGARUH KOMBINASI *Lactiplantibacillus plantarum* DAN *Saccharomyces cerevisiae*
TERHADAP NILAI *estimated Glycemic Index* (eGI) SECARA *In Vitro* DAN
KUALITAS ROTI GANDUM HITAM**

Aisatunnadiya Komala Mursyid, Ulfah Utami, Ahmad Barizi

Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri
Maulana Malik Ibrahim Malang

ABSTRAK

Diabetes merupakan penyakit metabolik yang ditandai oleh peningkatan kadar glukosa darah akibat gangguan sekresi maupun kerja insulin. Salah satu upaya pencegahannya adalah melalui konsumsi pangan dengan indeks glikemik rendah. Roti gandum hitam (*Secale cereal L.*) berpotensi dikembangkan sebagai pangan fungsional karena mengandung serat pangan yang mampu memperlambat pencernaan pati. Selain itu, fermentasi menggunakan bakteri asam laktat *Lactiplantibacillus plantarum* dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* diketahui dapat menurunkan respons glikemik pangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kombinasi *L. plantarum* dan *S. cerevisiae* terhadap kualitas organoleptik dan nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) roti gandum hitam secara *in vitro*. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan variasi konsentrasi BAL 2%, 3%, dan 4% serta khamir 1,5%, 2%, dan 2,5% dengan tiga kali ulangan. Nilai eGI dianalisis menggunakan metode hidrolisis pati secara *in vitro*, sedangkan kualitas organoleptik meliputi warna, aroma, rasa, dan tekstur diuji menggunakan uji hedonik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi *L. plantarum* dan *S. cerevisiae* berpengaruh nyata terhadap kualitas organoleptik dan nilai eGI roti gandum hitam. Perlakuan L3Y3 (BAL 4% dan khamir 2,5%) menghasilkan skor hedonik tertinggi pada seluruh parameter organoleptik serta nilai eGI terendah sebesar 55,33, dibandingkan perlakuan L1Y3 sebesar 59,67 dan kontrol sebesar 69,33. Peningkatan konsentrasi BAL dan khamir secara sinergis menurunkan nilai AUC, HI, dan eGI. Dengan demikian, kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* 4% dan *Saccharomyces cerevisiae* 2,5% merupakan perlakuan terbaik dalam meningkatkan kualitas roti sekaligus menurunkan nilai eGI, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai pangan fungsional untuk membantu pengendalian kadar glukosa darah.

Kata kunci: *Lactiplantibacillus plantarum*, *Saccharomyces cerevisiae*, roti gandum hitam, fermentasi, *estimated Glycemic Index* (eGI).

EFFECT OF A COMBINATION OF *Lactiplantibacillus plantarum* AND *Saccharomyces cerevisiae* ON THE *estimated Glycemic Index* (eGI) *In Vitro* AND THE QUALITY OF BLACK WHEAT BREAD

Aisatunnadiya Komala Mursyid, Ulfah Utami, Ahmad Barizi

Biology Program, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim
State Islamic University, Malang

ABSTRACT

Diabetes is a metabolic disease characterized by elevated blood glucose levels due to impaired insulin secretion or function. One preventive measure involves consuming foods with a low glycemic index. Black rye bread (*Secale cerealis* L.) has the potential to be developed as a functional food because it contains dietary fiber that slows down starch digestion. Additionally, fermentation using the lactic acid bacterium *Lactiplantibacillus plantarum* and the yeast *Saccharomyces cerevisiae* is known to reduce the glycemic response of food. This study aims to analyze the effect of a combination of *L. plantarum* and *S. cerevisiae* on the organoleptic quality and *estimated Glycemic Index* (eGI) of rye bread *in vitro*. The study employed a *Completely Randomized Design* (CRD) with variations in *L. plantarum* concentrations of 2%, 3%, and 4% and yeast concentrations of 1.5%, 2%, and 2.5%, with three replicates. The eGI value was analyzed using an *in vitro* starch hydrolysis method, while organoleptic quality including color, aroma, taste, and texture was assessed using a hedonic test. The results showed that the combination of *L. plantarum* and *S. cerevisiae* significantly affected the organoleptic quality and eGI value of whole wheat bread. Treatment L3Y3 (4% BAL and 2.5% yeast) yielded the highest hedonic scores across all organoleptic parameters and the lowest eGI value of 55.33, compared to treatment L1Y3 at 59.67 and the control at 69.33. Increasing the concentrations of BAL and yeast synergistically reduced the AUC, HI, and eGI values. Thus, the combination of 4% *Lactiplantibacillus plantarum* and 2.5% *Saccharomyces cerevisiae* is the best treatment for improving bread quality while lowering the eGI value, making it a potential functional food to aid in blood glucose control.

Keywords: *Lactiplantibacillus plantarum*, *Saccharomyces cerevisiae*, whole wheat bread, fermentation, *estimated Glycemic Index* (eGI).

تأثير مزيج على قيمة *Saccharomyces cerevisiae* و *Lactiplantibacillus plantarum* في المختبر وجودة خبز القمح الأسود (eGI) المؤشر الجلايسيمي المقدر

عيسة النادية كمال مرشد ، أولفا أواتمي ، أحمد باريزي

قسم علم الأحياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية في مالانج

ملخص

مرض السكري هو مرض استقلابي يتميز بارتفاع مستويات الجلوكوز في الدم نتيجة لاضطراب إفراز أو عمل الأنسولين. ومن بين جهود الوقاية منه تناول الأطعمة ذات المؤشر الجلايسيمي المنخفض. ويُعد خبز مادة واعدة لتطويرها كغذاء وظيفي لأنه يحتوي على ألياف غذائية (*Secale cereal L.*) القمح الأسود قادرة على إبطاء هضم النشا. بالإضافة إلى ذلك، من المعروف أن التخمر باستخدام بكتيريا حمض اللاكتيك يمكن أن يقلل من *Saccharomyces cerevisiae* وخميرة *Lactiplantibacillus plantarum* و *S. plantarum* الاستجابة الجلايسيمية للأغذية. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير مزيج لخبز القمح الأسود في (eGI) على الجودة الحسية والقيمة التقديرية لمؤشر الجلايسيمي *cerevisiae* *L. plantarum* مع تباينات في تركيزات (RAL) المختبر. استخدمت الدراسة تصميمًا عشوائيًا كاملاً eGI بنسبة 2% و3% و4%، والخميرة بنسبة 1.5% و2% و2.5%، مع ثلاث تكرارات. تم تحليل قيمة باستخدام طريقة تحليل النشا في المختبر، بينما تم اختبار الجودة الحسية التي تشمل اللون والرائحة والمذاق من *S. cerevisiae* و *L. plantarum* والملمس باستخدام الاختبار الهيدوني. أظهرت نتائج الدراسة أن مزيج من 4% L3Y3 لخبز القمح الأسود. أنتجت المعالجة eGI له تأثير ملحوظ على الجودة الحسية وقيمة eGI أعلى درجة متعة في جميع المعايير الحسية، بالإضافة إلى أدنى قيمة لـ (و2.5% من الخميرة BAL التي بلغت 59.67 والمعالجة الضابطة التي بلغت 69.33. أدى L1Y3 عند 55.33، مقارنةً بالمعالجة وبالتالي، فإن تركيبة eGI و HI و AUC والخميرة بشكل تآزري إلى خفض قيم BAL زيادة تركيز بنسبة 2,5% تمثل *Saccharomyces cerevisiae* بنسبة 4% و *Lactiplantibacillus plantarum* ، مما يجعلها قابلة للتطوير كغذاء وظيفي للمساعدة eGI أفضل معالجة لتحسين جودة الخبز مع خفض قيمة ، في التحكم في مستويات الجلوكوز في الدم. خبز القمح *Saccharomyces cerevisiae* ، *Lactiplantibacillus plantarum* :الكلمات المفتاحية (eGI) الأسود، التخمر، المؤشر الجلايسيمي المقدر

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Bismillahirrohmaanirrohiim, segala puji bagi Allah SWT atas berkat dan rahmat- Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul “Pengaruh Kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* Dan *Saccharomyces Cerevisiae* Terhadap Nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) Secara *In Vitro* dan Kualitas Roti Gandum Hitam” yang diperuntukkan sebagai salah satu syarat untuk menyandang gelar Sarjana Sains (S.Si). Tidak lupa pula shalawat dan salam disampaikan kepada junjungan Nabi besar Muhammad SAW. yang telah membawa umat manusia dari alam kebodohan ke alam yang berilmu pengetahuan. Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nurdiana, M.Si., CAHRM., CRMP. Selaku rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. H. Agus Mulyono, M.Kes., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Prof. Dr. Retno Susiowati M. Si. selaku Ketua Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
4. Prof. Dr. Hj. Ulfah Utami, M.Si dan Prof. Dr. Ahmad Barizi M.A selaku pembimbing I dan II, yang telah membimbing penulis dengan penuh kesabaran dan keikhlasan dalam meluangkan waktu untuk membimbing penulis
5. Fitriyah, S.Si., M.Si. selaku dosen wali, yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis selama masa perkuliahan
6. Seluruh dosen dan laboran di Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang setia menemani penulis dalam melakukan penelitian di laboratorium tersebut.
7. Ayah, Ibu, dan Adik yang sangat berjasa dalam hidup penulis. Terimakasih atas doa, cinta, kasih sang dan kepercayaan dari segala bentuk yang telah diberikan, sehingga penulis merasa terdukung di segala pilihan dan keputusan yang diambil oleh penulis, serta tanpa lelah mendengar kelus kesah penulis hingga di titik ini.
8. Sahabat dan teman - teman seperjuangan terutama teman - teman Biologi angkatan 22 yang telah memberikan motivasi, mendukung, menghibur dan memberikan semangat untuk pantang menyerah.
9. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terimakasih atas dukungan, semangat, saran, do'a dan pemikiran. Semoga Allah SWT memberikan balasan yang setimpal. Aamiin

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penulis harapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat terutama bagi penulis dan khususnya bagi para pembaca. Amiin Ya Rabbal'alamiin.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb

Malang, 11 Juni 2026

Aisatunnadiya Komala Mursyid

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
MOTTO	v
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI	vii
ABSTRAK	viii
ملخص.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	12
1.3 Tujuan Penelitian.....	12
1.4 Manfaat Penelitian.....	13
1.5 Batasan Masalah.....	13
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	15
2.1 Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir dalam Perspektif Al- Qur'an	15
2.2 Indeks Glikemik	17
2.2.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Indeks Glikemik	19
2.2.2 Metode Penentuan Indeks Glikemik.....	26
2.3 Roti	28
2.4 Gandum Hitam	30
2.5 Bakteri Asam Laktat.....	33
2.6 Khamir <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	35
2.7 Fermentasi BAL dan Khamir <i>Saccaromyces cerevisiae</i> terhadap Indeks Glikemik	36
2.8 Fermentasi BAL dan Khamir <i>Saccaromyces cerevisiae</i> terhadap Kualitas Roti	38
2.9 Integrasi Sains dan Islam tentang Mikroorganisme dan Fermentasi Pangan	40
BAB III METODE PENELITIAN	43
3.1 Rancangan Penelitian	43
3.2 Variabel Penelitian	43
3.2.1 Variabel bebas.....	43
3.2.2 Variabel Terikat	44
3.2.3 Variabel kontrol	44
3.3 Waktu dan Tempat Penelitian	44
3.4 Alat dan Bahan Penelitian	44
3.4.1 Alat Penelitian.....	44
3.4.2 Bahan Penelitian	45
3.5 Prosedur Penelitian.....	45

3.5.1 Sterilisasi Alat Dan Bahan	45
3.5.2 Pembuatan Media	45
3.5.3 Peremajaan Isolat	47
3.5.4 Perbanyakkan Isolat Khamir dan Pemanenan Biomassa Khamir.....	48
3.5.5 Penentuan Biomassa Khamir	49
3.5.6 Pembuatan Starter Bakteri Asam Laktat.....	50
3.5.7 Pembuatan Adonan Roti Gandum Hitam Kombinasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir.....	50
3.5.8 Pengukuran pH Adonan Roti Gandum Hitam Kombinasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir.....	51
3.5.9 Uji Kualitas Roti Gandum Hitam	51
3.6 Pengukuran Indeks Glikemik Secara <i>In Vitro</i> Roti Gandum Hitam	52
3.6.1 Persiapan Sampel	52
3.6.2 Hidrolisis Pati Secara <i>In Vitro</i>	52
3.6.3 Pembuatan Kurva Standar Glukosa	53
3.6.4 Penentuan Kadar Glukosa.....	54
3.6.5 Perhitungan estimated Glycemic Index (eGI)	54
3.7 Analisis Data	56
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1 Volume Pengembangan Roti Gandum Hitam	57
4.2 Kualitas Organoleptik Roti Gandum Hitam Hasil Fermentasi Kombinasi BAL <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> dan Khamir <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	61
4.2.1 Rasa.....	62
4.2.2 Aroma	63
4.2.3 Warna.....	65
4.2.4 Tekstur	67
4.3 Pengukuran Nilai estimated Glycemic Index (eGI) Roti Gandum Hitam Secara <i>In Vitro</i> Kombinasi BAL <i>Lactiplantibacillus plantarum</i> dan Khamir <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	69
4.3.1 Kurva Standar Glukosa.....	69
4.3.2 Kadar Glukosa Hasil Hidrolisis Pati.....	70
4.3.3 Nilai AUC (Area Under Curva).....	73
4.3.4 Nilai HI (Hydrolysis Index).....	75
4.3.5 Nilai estimated Glycemic Index (eGI).....	76
4.4 Tinjauan Hasil Penelitian dalam Perspektif Al-Qur'an	80
BAB V PENUTUP	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran	84
DAFTAR PUSTAKA.....	85
LAMPIRAN.....	95

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Klasifikasi nilai indeks glikemik	18
Tabel 2.2 Perbandingan Pandangan Sains dan Al Qur'an tentang Mikroorganisme dan Fermentasi Pangan.....	41
Tabel 3.1 Desain Penelitian RAL dengan faktor variasi konsentrasi kombinasi BAL dan Khamir	43
Tabel 4.1 Pengaruh Kombinasi BAL dan Khamir terhadap Rata-rata Nilai AUC Roti Gandum Hitam	74
Tabel 4.2 Pengaruh Kombinasi BAL dan Khamir terhadap Rata-rata Nilai HI Roti Gandum Hitam	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema penyerapan glukosa dari pangan yang memiliki indeks glikemik (IG). (A) rendah, (B) tinggi, pada saluran pencernaan (atas) beserta dengan kurva respon gula darah (bawah)	19
Gambar 2.2 . Struktur Molekul Amilosa dan Amilopektin, dua polimer utama penyusun granula pati	21
Gambar 2.3 Jalur homofermentatif fermentasi glukosa pada bakteri asam laktat	34
Gambar 2.4 Reaksi Maillaird	39
Gambar 4.1 Pengaruh Kombinasi BAL dan khamir terhadap volume adonan roti gandum hitam	57
Gambar 4.2 Volume pengembangan adonan roti gandum hitam. (A) Perlakuan L2Y3, L3Y3, dan Kontrol (-) pada menit ke-30, (B) L2Y3, L3Y3, dan Kontrol (-) pada menit ke-720	58
Gambar 4.3 Pengukuran pH adonan roti gandum hitam sebelum fermentasi dan sesudah fermentasi	60
Gambar 4.4 Warna roti gandum hitam. (A) Perlakuan L1Y3, (B) Perlakuan L3Y3, (C) Perlakuan kontrol negatif	65
Gambar 4.5 Tekstur roti gandum hitam. (A) Perlakuan L1Y3, (B) Perlakuan L3Y3, (C) Perlakuan kontrol negatif	68
Gambar 4.6 Kurva Standar Glukosa Roti Gandum Hitam	70
Gambar 4.7 Grafik Hidrolisis Pati Tiap Perlakuan.....	71

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Peremajaan Isolat Bakteri Asam Laktat dan Khamir <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	95
Lampiran 2. Hasil Pembuatan starter Bakteri Asam Laktat dan Hasil Pemanenan Isolat Khamir <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	95
Lampiran 3. Perhitungan Volume Pengembangan Adonan Roti Pada Perlakuan Variasi Konsentrasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	95
Lampiran 4. Data Hasil Pengukuran Volume Pengembangan Adonan Roti Gandum Hitam Dari Beberapa Semua Perlakuan pada Setiap Interval Waktu (0 – 720 menit)	96
Lampiran 5. Dokumentasi Pengembangan Adonan Roti Gandum Hitam Sebelum dan Sesudah Fermentasi.....	98
Lampiran 6. Dokumentasi Pengukuran pH Adonan Roti Gandum Hitam Sebelum dan Sesudah Fermentasi.....	101
Lampiran 7. Dokumentasi Tekstur Roti Gandum Hitam Antar Perlakuan	102
Lampiran 8. Dokumentasi Warna Roti Gandum Hitam Antar Perlakuan.....	103
Lampiran 9. Perhitungan Rata-rata Nilai Uji Organoleptik Roti Gandum Hitam	104
Lampiran 10. Data Uji Organoleptik Pada Perlakuan Kombinasi Bakteri Asam Laktat dan Khamir <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	105
Lampiran 11. Hasil Uji <i>Kruskall Wallis</i>	105
Lampiran 12. Hasil Uji Lanjut <i>Mann Whitney</i>	106
Lampiran 13. Dokumentasi Proses Pengujian <i>estimated Glycemic Index</i> (eGI) pada Roti Gandum Hitam Kombinasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	107
Lampiran 14. Data Absorbansi, Kadar Glukosa, dan Kadar Pati Terhidrolisis Sampel Roti Gandum Hitam.....	111
Lampiran 15. Cara Perhitungan Kadar Glukosa Hidrolisis Pati	114
Lampiran 16. Data Absorbansi, Kadar Glukosa, Kadar Pati, dan AUC Roti Putih	115
Lampiran 17. Data Nilai AUC, HI (%), dan eGI	115
Lampiran 18. Cara Perhitungan AUC, HI, dan eGI	116
Lampiran 19. Hasil Uji <i>One Way Anova</i> Nilai eGI.....	117
Lampiran 20. Hasil Uji Normalitas (<i>Kolmogorov-Smirnov</i>).....	117
Lampiran 21. Hasil Uji Homogenitas (<i>Levene's Test</i>)	117
Lampiran 22. Statistik Deskriptif	118

Lampiran 23.	Hasil Uji Lanjut DMRT (Duncan).....	118
---------------------	-------------------------------------	-----

BAB II

PENDAHULUAN

2.1 Latar belakang

Diabetes merupakan salah satu penyakit metabolik yang ditandai oleh kondisi hiperglikemia akibat gangguan produksi insulin, penurunan sensitivitas insulin, maupun kombinasi dari keduanya (Dini & Rustanti, 2014). Penyakit ini menjadi masalah kesehatan yang serius karena jumlah penderita terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Di Indonesia, diabetes termasuk salah satu penyebab kematian yang memiliki prevalensi tinggi. Data menunjukkan bahwa Indonesia menempati peringkat kelima negara dengan jumlah penderita diabetes terbanyak di dunia setelah China, India, Pakistan, dan Amerika Serikat. Pada tahun 2021, jumlah penderita diabetes di Indonesia mencapai 19,5 juta jiwa dan diperkirakan meningkat menjadi 21,3 juta jiwa pada tahun 2030 (IDF, 2021). Meningkatnya kasus diabetes berkaitan dengan berbagai faktor resiko, antara lain konsumsi pangan dengan indeks glikemik yang tinggi, tingginya muatan glikemik (*glycemic load*) serta rendahnya aktivitas fisik dalam kehidupan sehari-hari (Sagili *et al.*, 2022).

Salah satu faktor yang berkontribusi terhadap terjadinya diabetes adalah pola konsumsi makanan yang menghasilkan respon glukosa darah tinggi. Respons tersebut dapat diperkirakan melalui nilai indeks glikemik (IG), yaitu parameter yang menggambarkan kemampuan suatu pangan yang mengandung karbohidrat dalam meningkatkan kadar glukosa darah setelah dikonsumsi. Nilai IG diperoleh berdasarkan luas area dibawah kurva respon glukosa darah setelah mengonsumsi pangan yang mengandung 50 gram karbohidrat tersedia (*available carbohydrate*).

Pangan dengan nilai IG tinggi akan lebih cepat dicerna dan diserap oleh tubuh sehingga menyebabkan peningkatan kadar glukosa darah yang lebih cepat dibandingkan pangan dengan nilai IG rendah. Oleh karena itu, konsumsi pangan dengan nilai IG tinggi perlu dibatasi, terutama bagi individu yang beresiko maupun yang telah menderita diabetes (Muflihati, 2017). Sebaliknya, pangan dengan IG rendah diketahui mampu membantu menjaga kestabilan kadar glukosa darah serta mengurangi lonjakan kebutuhan insulin setelah makan (Augustin *et al.*, 2015). Dalam perspektif kesehatan, makanan yang baik untuk dikonsumsi tidak hanya bergizi, tetapi juga mampu memberikan manfaat bagi tubuh serta mendukung pemeliharaan kondisi kesehatan secara optimal. Sebagaimana terdapat dalam firman Allah SWT pada QS. Al Baqarah ayat 168 yang berbunyi :

يَا أَيُّهَا النَّاسُ كُلُوا مِمَّا فِي الْأَرْضِ حَلَالًا طَيِّبًا وَلَا تَتَّبِعُوا خُطُوَاتِ الشَّيْطَانِ إِنَّهُ لَكُمْ عَدُوٌّ مُبِينٌ ١٦٨

Artinya : *“Wahai manusia, makanlah sebagian (makanan) di bumi yang halal lagi baik dan janganlah mengikuti langkah-langkah setan. Sesungguhnya ia bagimu merupakan musuh yang nyata.”* (QS. Al Baqarah : 168).

Lafadz **حَلَالًا طَيِّبًا** berarti makanan yang halal secara hukum dan thayyib yang berarti baik secara kualitas yaitu bersih dan sehat. Ayat ini menjelaskan bahwa Allah swt memerintahkan agar manusia memanfaatkan rezeki yang ada di bumi dengan cara yang halal dan baik (thayyib). Prinsip *halalan thayyiban* dalam Tafsir Al-Misbah (Shihab, 2002) kata “halal” yaitu diperbolehkan menurut hukum, tidak tercampur unsur haram seperti bangkai, darah, riba, atau perolehan yang tidak sah. Sedangkan kata “thayyib” yaitu baik, bersih, menyehatkan, dan tidak membahayakan tubuh dan jiwa manusia.

Pangan yang mengandung sedikit karbohidrat atau bahkan tidak mengandung karbohidrat seperti daging dan keju, umumnya memiliki nilai indeks glikemik (IG) yang sangat rendah. Sebaliknya nasi dan roti berbasis gandum termasuk pangan dengan nilai indeks glikemik yang relatif tinggi. Kondisi tersebut disebabkan oleh kandungan karbohidrat yang mudah dicerna dan diserap oleh tubuh sehingga glukosa hasil pemecahan karbohidrat dapat dengan cepat memasuki aliran darah dan meningkatkan kadar gula darah (Muflihati, 2017). Berdasarkan nilainya, indeks glikemik dikelompokkan menjadi tiga kategori yaitu rendah (<55), sedang (55-69), dan tinggi (≥ 70) (Arif *et al.*, 2014).

Produk pangan berbahan dasar tepung, termasuk roti, umumnya memiliki nilai indeks glikemik yang cukup tinggi (Muflihati, 2017). Penelitian Widanagamage (2013) melaporkan bahwa roti sebagai salah satu pangan berbasis pati yang banyak dikonsumsi di kawasan Asia Selatan, memiliki nilai indeks glikemik sekitar 60 yang termasuk kategori sedang. Selain itu, Mulyadi (2014) menyatakan bahwa roti yang digunakan sebagai pangan uji memiliki nilai indeks glikemik sebesar 71. Roti merupakan salah satu produk pangan yang dikonsumsi secara luas diberbagai negara dan berperan sebagai sumber karbohidrat utama bagi masyarakat. Produk ini dibuat dari bahan baku biji-bijian dan mengandung berbagai zat gizi, seperti karbohidrat, protein, serat pangan, vitamin, serta komponen nutrisi lainnya yang mendukung kebutuhan tubuh (Demirkesen *et al.*, 2021).

Biji-bijian merupakan bagian tumbuhan yang berfungsi sebagai tempat penyimpan cadangan makanan, yang tersusun atas karbohidrat, protein, lemak, vitamin, dan mineral yang penting bagi pertumbuhan tanaman serta bermanfaat

sebagai sumber energi bagi manusia (Shewry & Hey, 2015). Dalam bidang pangan, biji-bijian termasuk kelompok sumber karbohidrat kompleks utama yang banyak dikonsumsi sebagai bahan pangan pokok maupun bahan baku berbagai produk olahan, baik dalam bentuk sereal seperti gandum, beras, dan jagung. Sebagaimana terdapat dalam QS. ‘Abasa ayat 24 – 32 sebagai berikut :

كَلَّا لَمَّا يَقْضِ مَا أَمَرَهُ ۚ ٢٣ فَلْيَنْظُرِ الْإِنْسَانُ إِلَى طَعَامِهِ ۚ ٢٤ أَنَّا صَبَبْنَا الْمَاءَ صَبًّا ٢٥ ثُمَّ شَقَقْنَا الْأَرْضَ شَقًّا ٢٦ فَأَنْبَتْنَا فِيهَا حَبًّا ٢٧ وَعَيْنًا وَقَضْبًا ٢٨ وَزَيْتُونًا وَنَخْلًا ٢٩ وَحَدَاقٍ غُلْبًا ٣٠ وَفَاكِهَةً وَأَبًّا ٣١ مَتَاعًا لَّكُمْ وَلِأَنْعَامِكُمْ ٣٢

Artinya : “Maka hendaklah manusia memperhatikan makanannya. Sesungguhnya Kami benar-benar telah mencurahkan air (dari langit) dengan deras, kemudian Kami belah bumi dengan sebaik-baiknya, lalu Kami tumbuhkan biji-bijian di bumi itu, dan anggur serta sayur-sayuran, zaitun dan pohon kurma, kebun-kebun (yang) rindang, dan buah-buahan serta rumput-rumputan, semua itu untuk kesenanganmu dan untuk ternak-ternakmu.” (QS. ‘Abasa :24–32).

Menurut Shihab (2002) dalam Tafsir Al Mishbah, menjelaskan bahwa Allah menurunkan air hujan dari langit, kemudian dengan air itu tumbuh lah berbagai jenis tumbuhan seperti biji-bijian, anggur, sayur-sayuran, zaitun, kurma, serta kebun-kebun yang rimbun dan buah-buahan. Semua itu merupakan bentuk kasih sayang dan kebesaran Allah yang menyediakan bahan pangan bagi manusia dan hewan. Ayat tersebut menunjukkan bahwa biji-bijian merupakan salah satu sumber pangan penting yang Allah SWT sediakan untuk memenuhi kebutuhan manusia. Dalam Al-Qur’an menegaskan pentingnya memperhatikan makanan yang berasal dari hasil bumi, termasuk biji-bijian yang tumbuh subur sebagai anugerah bagi manusia. Salah satu biji-bijian yang banyak dimanfaatkan adalah gandum, yang menjadi bahan baku utama berbagai produk makanan olahan, khususnya roti.

Produk pangan berbahan dasar gandum, terutama roti umumnya memiliki kandungan karbohidrat yang tinggi dan kadar serat pangan yang relatif rendah sehingga cenderung menghasilkan nilai indeks glikemik yang tinggi. Berbagai upaya dapat dilakukan untuk menurunkan nilai indeks glikemik roti, diantaranya melalui penambahan pati resisten (*resistant starch*) maupun serat pangan tambahan. Perlakuan tersebut mampu memperlambat proses pencernaan karbohidrat sehingga respon glukosa darah setelah konsumsi menjadi lebih rendah. Salah satu alternatif yang dapat diterapkan adalah penggunaan *rye grain* atau gandum hitam sebagai bahan baku. Dibandingkan gandum biasa, gandum hitam memiliki kandungan serat yang lebih tinggi serta kandungan lemak dan protein yang relatif lebih rendah (Muflihati, 2017). Menurut Iversen *et al.*, (2022), produk pangan berbasis gandum hitam termasuk kelompok pangan dengan indeks glikemik rendah yang mampu menghasilkan respons glukosa dan insulin yang lebih terkendali. Efek tersebut berkaitan dengan tingginya kandungan serat pangan serta struktur matriks gandum hitam yang dapat memperlambat proses pencernaan dan penyerapan karbohidrat.

Gandum hitam diketahui memiliki kandungan zat gizi yang lebih beragam dibandingkan gandum konvensional karena mengandung protein, karbohidrat, vitamin, mineral dalam jumlah yang cukup tinggi (Saeed *et al.*, 2025). Kandungan tersebut menjadikan gandum hitam berpotensi memberikan manfaat kesehatan, terutama dalam membantu pengendalian kadar glukosa darah. Harga gandum hitam relatif lebih tinggi karena termasuk varietas khusus yang memiliki kandungan senyawa bioaktif lebih banyak serta ketersediaan produksi yang masih terbatas (Gautam & Kumar, 2022). Selain itu, gandum hitam memiliki kandungan

serat pangan tertinggi diantara kelompok sereal, yang dapat mencapai kurang lebih dari 20% berat kering, sedangkan gandum putih, oat, dan barley umumnya hanya mengandung sekitar 10-15% serat pangan. Meskipun demikian, jumlah serat tersebut dapat bervariasi tergantung pada varietas dan teknik budidaya yang digunakan. Kandungan arabinoksilan pada gandum hitam dilaporkan sekitar 50% lebih tinggi dibandingkan gandum biasa dan sebagian besar berada dalam bentuk larut air (Iversen *et al.*, 2022). Fermentasi gandum hitam menggunakan mikroorganisme probiotik terbukti mampu meningkatkan kadar serat pangan larut sekaligus memodifikasi komposisi serat kompleks sehingga berpotensi menghasilkan roti dengan nilai indeks glikemik yang lebih rendah (Koj & Pejcz, 2023).

Kelebihan lain dari gandum hitam terletak pada profil asam amino yang lebih lengkap dibandingkan gandum putih. Gandum hitam mengandung lisin dalam kadar yang relatif lebih tinggi, yaitu asam amino esensial yang umumnya menjadi faktor pembatas pada protein sereal. Kandungan protein gandum hitam berkisar antara 9,0–15,4% berat kering, dengan komposisi gluten yang berbeda dari gandum putih, di mana gandum hitam mengandung gliadin dalam jumlah lebih tinggi namun glutenin yang lebih rendah, sehingga membentuk adonan dengan sifat viskoelastis yang berbeda namun tetap dapat diolah menjadi produk roti (Dziki, 2022).

Salah satu kelompok mikroorganisme probiotik yang banyak dimanfaatkan dalam fermentasi pangan adalah Bakteri Asam Laktat (BAL). Kelompok bakteri ini telah digunakan secara luas dalam berbagai produk fermentasi, termasuk roti, yoghurt, dan keju. BAL juga termasuk mikroorganisme

yang berstatus *Generally Recognized As Safe* (GRAS), sehingga dinilai aman untuk digunakan dalam industri pangan (Breton *et al.*, 2020). Beberapa spesies BAL yang umum digunakan dalam fermentasi pangan antara lain *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus fermentum*, *Lactobacillus brevis* dan *Leuconostoc mesenteroides* (Penido *et al.*, 2018). Berdasarkan klasifikasi taksonomi terbaru, *Lactobacillus plantarum* saat ini dikenal dengan nama *Lactiplantibacillus plantarum*. Mikroorganisme ini dapat ditemukan pada berbagai lingkungan, mulai dari saluran pencernaan manusia hingga beragam produk pangan fermentasi (Echegary *et al.*, 2023).

Bakteri Asam Laktat (BAL) menghasilkan asam organik berupa asam laktat dan asam asetat selama fermentasi. Asam laktat berperan menurunkan pH adonan dan membentuk kompleks dengan molekul pati sehingga mengurangi ketersediaan pati untuk dicerna, sedangkan asam asetat berkontribusi dalam memperlambat pengosongan lambung. Keduanya secara sinergis menghambat aktivitas enzim α -amilase yang berperan dalam pemecahan pati menjadi glukosa, sehingga laju hidrolisis pati melambat dan berdampak pada penurunan nilai indeks glikemik roti (De Angelis, 2007; Demirkesen *et al.*, 2021). Selain BAL, mikroorganisme lain yang berperan penting dalam fermentasi roti adalah khamir *saccharomyces cerevisiae*. Khamir ini menghasilkan enzim invertase yang menguraikan sukrosa menjadi gula sederhana, kemudian di fermentasi menjadi gas CO₂ dan etanol yang membantu pengembangan adonan. Proses fermentasi kombinasi selain berfungsi menghasilkan cita rasa dan tekstur pada roti, tetapi juga dapat menurunkan kadar gula yang mudah dicerna (Wang *et al.*, 2021).

Bakteri Asam Laktat (BAL) dan khamir merupakan makhluk hidup ciptaan Allah SWT yang termasuk ke dalam kelompok mikroorganisme atau mikroba, yaitu makhluk hidup berukuran mikroskopis yang tidak dapat dilihat langsung oleh indera penglihatan tanpa bantuan alat. Dalam Al-Qur'an, Allah SWT berfirman dalam Surah Yunus ayat 61 sebagai berikut :

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْآنٍ وَلَا تَعْمَلُونَ مِنْ عَمَلٍ إِلَّا كُنَّا عَلَيْكُمْ شُهُودًا إِذْ تُفِيضُونَ فِيهِ وَمَا يَعْزُبُ عَنْ رَبِّكَ مِنْ مِثْقَالِ ذَرَّةٍ فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ وَلَا أَصْغَرَ مِنْ ذَلِكَ وَلَا أَكْبَرَ إِلَّا فِي كِتَابٍ مُبِينٍ ٦١

Artinya : *"Dan engkau (Muhammad) tidak berada dalam suatu urusan, dan tidak membaca suatu ayat dari Al-Qur'an, dan kamu tidak mengerjakan suatu pekerjaan, melainkan Kami menjadi saksi atasmu ketika kamu melakukannya. Tidak luput dari pengetahuan Tuhanmu sekalipun seberat zarrah (atom) di bumi dan tidak (pula) di langit, dan tidak ada yang lebih kecil dari itu dan tidak (pula) yang lebih besar, melainkan (semua) tertulis dalam kitab yang nyata (Lauh Mahfuz)." (QS. Yunus : 61).*

Lafadz (ذَرَّةٍ) dalam ayat tersebut diartikan sebagai sesuatu yang sangat kecil yang menggambarkan kehalusan dan ketelitian ciptaan Allah SWT. Dalam konteks sains, makna *dzarrah* dapat dipahami sebagai representasi dari partikel mikroskopis, termasuk mikroorganisme seperti bakteri dan khamir yang tidak terlihat oleh mata manusia, namun memiliki peranan besar dalam keseimbangan kehidupan. Menurut Tafsir Al-Mishbah (Shihab, 2002), ayat ini menunjukkan bahwa Allah SWT Maha teliti terhadap segala sesuatu, bahkan sekecil *dzarrah*. Tidak ada ciptaan-Nya yang sia-sia, karena setiap makhluk memiliki fungsi dan manfaat tertentu dalam sistem kehidupan. Begitu pula mikroorganisme seperti Bakteri Asam Laktat (BAL) dan khamir (*Saccharomyces cerevisiae*), meskipun ukurannya sangat kecil, memiliki manfaat besar dalam bidang pangan dan kesehatan manusia.

Keduanya diciptakan oleh Allah SWT dengan membawa manfaat bagi kehidupan manusia khususnya dalam bidang pangan melalui proses fermentasi. Penggunaan kombinasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan khamir melalui fermentasi menghasilkan asam organik yang dapat menurunkan pH adonan roti serta memperlambat enzim amilase yang berfungsi mencerna pati atau memecah pati yang dapat meningkatkan aktivitas fermentasi, produksi CO₂ dan meningkatkan kualitas roti. Pembentukan asam organik dari bakteri asam laktat menyebabkan peningkatan pati resisten dan serat larut yang berdampak pada pelepasan glukosa sehingga dapat menurunkan indeks glikemik (Demirkesen *et al.*, 2021). Penelitian ini menggunakan tepung gandum hitam yang memiliki karakteristik yang berbeda, yaitu kandungan gliadin yang tinggi namun gluten yang rendah sehingga menghasilkan adonan dengan elastisitas yang lebih lemah (Gao *et al.*, 2017; Deleu *et al.*, 2020). Kondisi ini menjadikan proses fermentasi pada adonan gandum hitam memerlukan pendekatan yang lebih optimal dibandingkan roti berbahan dasar tepung terigu pada umumnya. Salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah penggunaan kombinasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan khamir, dimana keduanya bekerja secara sinergis dalam proses fermentasi. Kombinasi ini terbukti lebih efektif dalam menurunkan respons glikemik dibandingkan fermentasi menggunakan khamir tunggal (Demirkesen *et al.*, 2021).

Penelitian ini menggunakan kombinasi BAL dengan konsentrasi 2%, 3%, dan 4%, serta khamir *Saccharomyces cerevisiae* dengan konsentrasi 1,5%, 2%, dan 2,5%. Penggunaan BAL hingga 4% didasarkan bahwa konsentrasi BAL yang lebih tinggi cenderung menghasilkan asam organik yang tinggi, sehingga

menyebabkan penurunan pH yang menghambat aktivitas khamir dalam memproduksi gas CO₂ secara optimal (Mou *et al.*, 2025). Konsentrasi khamir dibatasi hingga 2,5% didasarkan pada penelitian Wang *et al.* (2024) yang menunjukkan bahwa konsentrasi khamir yang terlalu tinggi selama fermentasi menghasilkan gaya ekspansi gas karbon dioksida melebihi kekuatan struktur jaringan gluten, menyebabkan kerusakan pada struktur internal dan berdampak negatif pada elastisitas.

Jenis khamir yang digunakan pada penelitian ini adalah *Saccharomyces cerevisiae*. *Saccharomyces cerevisiae* dikenal luas sebagai ragi roti yang telah dimanfaatkan selama ratusan tahun (Montes *et al.*, 2016). Khamir yang digunakan adalah *Saccharomyces cerevisiae* yang diisolasi dari daging buah salak pondoh (*Salacca edulis Reinw.*). Selain itu isolat ini mampu memfermentasi empat jenis gula yaitu glukosa, fruktosa, sukrosa dan galaktosa (Sari, 2020). Penelitian ini menggunakan Bakteri Asam Laktat (BAL) *Lactiplantibacillus plantarum* yang diisolasi dari buah apel variates Anna (*Malus sylvestris Mill.*) yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya oleh Azzahra (2024) memiliki kemampuan menghasilkan eksopolisakarida (EPS) tertinggi. Pemilihan BAL tersebut didasarkan pada kemampuannya dalam memproduksi EPS dalam jumlah tinggi, yang berperan dalam mengikat air dan mempertahankan gas CO₂ selama proses fermentasi. Oleh karena itu, BAL ini dinilai sesuai untuk diaplikasikan dalam pembuatan roti gandum hitam yang memiliki kandungan serat tinggi dan kadar gluten yang rendah (Ramos *et al.*, 2021).

Pengujian lanjutan terhadap kombinasi BAL *Lactiplantibacillus plantarum* dan khamir *Saccaromyces cerevisiae* juga dapat memengaruhi kualitas

roti gandum hitam. Fermentasi menghasilkan berbagai senyawa volatil seperti asam organik yang berperan penting dalam pembentukan aroma dan cita rasa khas roti (Demirkesen *et al.*, 2021). Uji organoleptik merupakan pengujian dengan menggunakan indra manusia sebagai alat ukur terhadap penerimaan suatu produk (Adiluhung & Sutrisno, 2018). Pengujian ini dilakukan untuk menilai preferensi konsumen terhadap roti yang dihasilkan dan menentukan kualitas sensori seperti warna, aroma, tekstur dan rasa roti gandum hitam (Litwinek *et al.*, 2022). Menurut penelitian Demirkesen *et al.* (2021), fermentasi kombinasi BAL dan khamir pada roti berbasis gandum hitam tidak hanya menurunkan indeks glikemik tetapi juga meningkatkan sifat sensori seperti cita rasa, aroma dan tekstur pada roti dibandingkan fermentasi tunggal oleh khamir.

Dalam penelitian ini, pengujian nilai indeks glikemik dilakukan secara tidak langsung yaitu menggunakan metode *in vitro*. Metode ini meniru proses fisikokimia, proses yang terlibat dalam pencernaan karbohidrat yang terjadi di saluran pencernaan bagian atas manusia (lambung dan usus halus). Proses tersebut meniru tahapan hidrolisis (pemecahan) pati menjadi glukosa oleh enzim pencernaan. Hidrolisis bertujuan untuk mensimulasikan prosedur *in vivo* (Ferrer *et al.*, 2012). Tahapan hidrolisis enzimatis menggunakan enzim pepsin, pankreatin, dan amiloglukosidase sebagaimana dikembangkan oleh Argyri *et al.*, (2016). Menurut Nurhayati *et al.*, (2019), metode *in vitro* lebih efisien dan tidak memerlukan uji klinis pada manusia (*in vivo*) serta cocok digunakan untuk skrining awal indeks glikemik dari berbagai produk pangan yang hasilnya menunjukkan perkiraan indeks glikemik (*estimated Glycemic Indeks/ eGI*).

Latar belakang tersebut menjadi dasar dilakukannya penelitian mengenai penambahan campuran Bakteri Asam Laktat (BAL) *Lactiplantibacillus plantarum* dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* pada roti gandum hitam. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh fermentasi kombinasi BAL dan khamir terhadap nilai indeks glikemik (IG) roti gandum hitam menggunakan metode *in vitro* dan mengetahui kualitas pada roti gandum hitam. Melalui kombinasi kedua mikroorganisme tersebut, diharapkan dapat dihasilkan roti gandum hitam dengan nilai indeks glikemik yang lebih rendah dibandingkan roti tanpa perlakuan fermentasi mikroba, sehingga berpotensi dikembangkan sebagai pangan fungsional yang mendukung pengendalian kadar glukosa darah dan pencegahan penyakit metabolik seperti diabetes.

2.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccaromyces cerevisiae* terhadap volume pengembangan dan kualitas organoleptik roti gandum hitam, meliputi warna, aroma, rasa, dan tekstur?
2. Bagaimana pengaruh kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccaromyces cerevisiae* terhadap nilai *estimated glycemic index* (eGI) roti gandum hitam secara *in vitro*?

2.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menganalisis pengaruh fermentasi kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccaromyces cerevisiae* terhadap volume pengembangan

dan kualitas organoleptik roti gandum hitam, meliputi warna, aroma, rasa, dan tekstur

2. Untuk mengetahui pengaruh kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccaromyces cerevisiae* terhadap nilai *estimated glycemic index* (eGI) roti gandum hitam menggunakan metode *in vitro*.

2.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan informasi mengenai penurunan nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) pada roti gandum hitam hasil fermentasi kombinasi Bakteri Asam Laktat *Lactiplantibacillus plantarum* dan Khamir *Saccaromyces cerevisiae*.
2. Penelitian yang dilakukan diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan produk roti gandum hitam hasil fermentasi sebagai pangan fungsional rendah indeks glikemik yang berpotensi mendukung pengendalian kadar glukosa darah serta pencegahan penyakit metabolik seperti diabetes.
3. Penelitian yang dilakukan diharapkan dapat menghasilkan roti fermentasi dengan kualitas yang tinggi serta memberikan alternatif pangan fungsional yang lebih sehat.

2.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini menggunakan satu jenis tepung, yaitu tepung gandum hitam (*rye flour*) sebagai bahan utama pembuatan roti.
2. Isolat *Saccharomyces cerevisiae* berasal dari hasil isolasi daging buah salak pondoh (*Salacca edulis Reinw.*).

3. Isolat Bakteri Asam Laktat (BAL) yaitu *Lactiplantibacillus plantarum* berasal dari hasil isolasi buah apel varietas Anna (*Malus sylvestris* Mill).
4. Variasi konsentrasi penambahan *Saccaromyces cerevisiae* dan BAL *Lactiplantibacillus plantarum* dengan konsentrasi kombinasi khamir 1,5%, 2% dan 2,5% (w/w) dan BAL 2%, 3%, dan 4% (v/w) serta kontrol negatif.
5. Uji nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) menggunakan metode *in vitro*.
6. Pengujian nilai eGI dilakukan secara *in vitro* menggunakan metode hidrolisis pati dengan reagen 3,5-dinitrosalisilat (DNS).
7. Pengujian nilai eGI menggunakan enzim pepsin, amilase dan glukoamilase.
8. Pengambilan aliquot waktu hidrolisis pati 0, 30, 60, 90, dan 120.
9. Pengujian kualitas roti yang dilakukan melalui uji organoleptik dengan parameter warna, aroma, rasa, dan tekstur.

BAB III

TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir dalam Perspektif Al- Qur'an

Bakteri dan khamir merupakan makhluk hidup ciptaan Allah SWT yang termasuk ke dalam kelompok mikroorganisme, yaitu makhluk hidup berukuran mikroskopis yang tidak dapat dilihat secara langsung oleh mata manusia. Khamir merupakan makhluk ciptaan Allah SWT yang memiliki kedekatan dengan fungi atau jamur, karena menurut sains fungi merupakan organisme eukariotik yang terdiri dari khamir, kapang, dan cendawan (Vivek & Venkitasamy, 2023). Sebagaimana Allah SWT berfirman dalam Q.S Al-Baqarah [2]: 26, sebagai berikut:

﴿ إِنَّ اللَّهَ لَا يَسْتَحْيِي ۚ أَنْ يَضْرِبَ مَثَلًا مَّا بَعُوضَةً فَمَا فَوْقَهَا ۚ فَأَمَّا الَّذِينَ آمَنُوا فَيَعْلَمُونَ أَنَّهُ الْحَقُّ مِنْ رَبِّهِمْ ۚ وَأَمَّا الَّذِينَ كَفَرُوا فَيَقُولُونَ مَاذَا أَرَادَ اللَّهُ بِهَذَا مَثَلًا ۖ يُضِلُّ بِهِ ۚ كَثِيرًا وَيَهْدِي بِهِ ۚ كَثِيرًا ۚ وَمَا يُضِلُّ بِهِ إِلَّا الْفَاسِقِينَ ۚ ٢٦ ﴾

Artinya : "Sesungguhnya Allah tiada segan membuat perumpamaan berupa nyamuk atau yang lebih kecil dari itu. Adapun orang-orang yang beriman, mereka tahu bahwa perumpamaan itu benar dari Tuhan, tetapi mereka yang kafir berkata: "Apa maksud Allah dengan perumpamaan ini?". Dengan perumpamaan itu banyak orang yang disesatkan Allah, dan dengan perumpamaan itu banyak (pula) orang yang diberi-Nya petunjuk. Dan tidak ada yang disesatkan kecuali orang - orang yang fasik". (Q.S Al Baqarah : 26).

Tafsir jalalain menjelaskan istilah *بَعُوضَةً* diartikan sebagai bentuk tunggal dari kata *ba'udh*, yaitu kutu yang sangat kecil. Menurut Tafsir Al Misbah (Shihab, 2002) ayat tersebut mengandung makna perumpamaan, yang menunjukkan bahwa Allah swt tidak malu menjadikan makhluk yang sangat kecil sekalipun sebagai kebesaran dan kekuasaan - Nya. Sekecil apa pun ciptaan Allah, tetap

mengandung hikmah dan manfaat yang besar bagi kehidupan manusia khususnya dalam bidang pangan. Perumpamaan ini sangat relevan dengan keberadaan mikroorganisme, yang secara fisik sangat kecil dan tidak tampak oleh mata, namun memiliki peran besar dalam berbagai proses biologis seperti fermentasi yaitu Bakteri Asam Laktat (BAL) dan khamir.

Pemanfaatan mikroorganisme melalui kombinasi antara Bakteri Asam Laktat (BAL) dan khamir. Kolaborasi ini menciptakan kerja sama yang menghasilkan manfaat lebih besar dibandingkan dengan bekerja sendiri-sendiri. Menurut Litwinek *et al.* (2022), khamir dan BAL mampu berperan bersama dalam proses fermentasi, menghasilkan produk pangan yang lebih bergizi serta memberikan dampak positif bagi kesehatan manusia. Sinergi ini terinspirasi dari firman Allah SWT dalam QS. Al-Maidah ayat 2 adalah sebagai berikut :

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا لَا تَحْلُوا شَعَائِرَ اللَّهِ وَلَا الشَّهْرَ الْحَرَامَ وَلَا الْهَدْيَ وَلَا الْقَلَائِدَ وَلَا آمِينَ
الْبَيْتِ الْحَرَامَ يَتَّبِعُونَ فَضْلًا مِّن رَّبِّهِمْ وَرِضْوَانًا وَإِذَا حَلَلْتُمْ فَاصْطَادُوا وَلَا يَجْرِمَنَّكُمْ شَنَاٰنُ قَوْمٍ
أَن صَدُّوكُم مِّنَ الْمَسْجِدِ الْحَرَامِ أَن تَعْتَدُوا وَتَعَاوَنُوا عَلَى الْبِرِّ وَالتَّقْوَىٰ وَلَا تَعَاوَنُوا عَلَى
الْإِثْمِ وَالْعُدْوَانِ وَاتَّقُوا اللَّهَ إِنَّ اللَّهَ شَدِيدُ الْعِقَابِ ۚ

Artinya: “Wahai orang-orang yang beriman, janganlah kamu melanggar syiar-syiar (kesucian) Allah, jangan (melanggar kehormatan) bulan-bulan haram, jangan (mengganggu) hadyu (hewan-hewan kurban) dan qalā'id (hewan-hewan kurban yang diberi tanda), dan jangan (pula mengganggu) para pengunjung Baitulharam sedangkan mereka mencari karunia dan rida Tuhannya! Apabila kamu telah bertahalul (menyelesaikan ihram), berburulah (jika mau). Janganlah sekali-kali kebencian(-mu) kepada suatu kaum, karena mereka menghalang-halangiimu dari Masjidilharam, mendorongmu berbuat melampaui batas (kepada mereka). Tolong-menolonglah kamu dalam (mengerjakan) kebajikan dan takwa, dan jangan tolong-menolong dalam berbuat dosa dan permusuhan. Bertakwalah kepada Allah, sesungguhnya Allah sangat berat siksaan-Nya”. (QS. Al-Maidah : 2)

Tafsir Ibnu Katsir menjelaskan bahwa Allah memerintahkan hamba-Nya yang beriman untuk senantiasa tolong menolong dalam perbuatan baik yang disebut kebajikan (الْبِرّ) serta meninggalkan perbuatan munkar. Dalam lafadz yang berarti tolong menolong (تَعَاوُنًا), Allah swt melarang untuk tolong menolong dalam perbuatan dosa. Bakteri Asam Laktat (BAL) dan khamir bekerja sama sehingga dapat menghasilkan pangan yang lebih bergizi dan bermanfaat bagi kesehatan manusia. Hal ini dapat dianalogikan seperti sinergi antara bakteri asam laktat dan khamir yang saling bekerja sama untuk menghasilkan produk pangan yang berkualitas tinggi (Litwinek *et al.*, 2022).

3.2 Indeks Glikemik

Indeks glikemik adalah ukuran kecepatan makanan yang diserap menjadi gula darah. Indeks glikemik dihitung dari luas area dibawah kurva glukosa darah (AUC) makanan uji dengan AUC makanan acuan (biasanya berupa glukosa atau roti tawar) yang masing-masing mengandung 50 gram *available karbohidrat* dan diujikan pada individu yang sama dalam periode 2 jam setelah mengkonsumsi pangan (Sunani & Hendriani, 2023). Indeks glikemik (IG) adalah indeks untuk mengkategorikan makanan yang mengandung karbohidrat berdasarkan efeknya pada tingkat gula darah. Ini dapat digambarkan secara matematis melalui rumus sebagai berikut (Sagilli *et al.*, 2022) :

$$\text{Indeks Glikemik (IG)} = \frac{\text{luas kurva sampel}}{\text{luas kurva glukosa}} \times 100\%$$

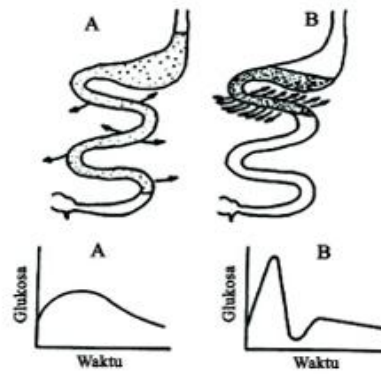
Indeks glikemik dapat dijadikan acuan dalam memilih jenis makanan yang sesuai untuk pola makan pada pengendalian kadar gula darah (Sunani & Hendriani, 2023). Nilai indeks glikemik (IG) sering dikaitkan dengan pangan berbasis karbohidrat (Sack *et al.*, 2014). Makanan yang sedikit atau tidak

mengandung karbohidrat, seperti daging dan keju memiliki indeks glikemik yang sangat rendah. Semakin sedikit makanan mengandung pati dan gula yang mudah di cerna, semakin kecil nilai indeks glikemiknya. Sedangkan nasi dan roti gandum merupakan contoh jenis makanan yang mengandung indeks glikemik yang tinggi. Hal ini disebabkan karena nasi dan roti gandum mengandung karbohidrat kompleks (pati) yang mudah dipecah menjadi glukosa dan cepat diserap oleh usus, sehingga menyebabkan peningkatan kadar gula darah yang tinggi. Semakin tinggi indeks suatu makanan, semakin cepat dampaknya terhadap kenaikan gula darah. Sehingga makanan dengan indeks glikemik yang tinggi harus dihindari oleh para penderita diabetes (Muflihati, 2017). Menurut Arif *et al.*, (2014) Nilai indeks glikemik dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori yaitu rendah <55 , sedang 55 - 69, dan tinggi ≥ 70 (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Klasifikasi nilai indeks glikemik

Klasifikasi Indeks Glikemik	Nilai Indeks Glikemik
Rendah	<55
Sedang	55 - 69
Tinggi	≥ 70

Secara umum, pangan yang dicerna dan diserap cepat akan menghasilkan peningkatan gula darah yang tinggi sehingga memiliki nilai IG tinggi, sedangkan pangan yang dicerna lebih lambat, menyebabkan kenaikan gula darah yang lebih perlahan atau stabil, sehingga memiliki nilai IG rendah (Arif *et al.*, 2014). Menurut Hoerudin (2012) pangan dengan IG rendah dan tinggi dapat dibedakan berdasarkan kecepatan pencernaan dan penyerapan glukosa serta fluktuasi kadarnya dalam darah (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Skema penyerapan glukosa dari pangan yang memiliki indeks glikemik (IG). (A) rendah, (B) tinggi, pada saluran pencernaan (atas) beserta dengan kurva respon gula darah (bawah) (Hoerudin, 2012).

Pangan dengan IG rendah memiliki sifat yang menyebabkan proses pencernaan di perut berlangsung lambat, sehingga laju pengosongan perut pun ikut terlambat. Ini mengakibatkan pencernaan karbohidrat dan penyerapan glukosa di usus kecil yang berlangsung lebih lambat. Mayoritas penyerapan gula terjadi di bagian atas (duodenum) dan tengah (jejunum) dari usus kecil (Sunani, 2023). Akibatnya, fluktuasi kadar glukosa darah relatif kecil seperti yang ditunjukkan dengan kurva respons glikemik yang landai (Gambar 2.1 A). Sebaliknya, pangan dengan IG tinggi mencirikan laju pengosongan perut, pencernaan karbohidrat, dan penyerapan glukosa yang berlangsung cepat, sehingga fluktuasi kadar glukosa darah juga relatif tinggi. Hal tersebut karena penyerapan glukosa sebagian besar hanya terjadi pada usus kecil bagian atas (Gambar 2.1 B).

3.2.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Indeks Glikemik

Pangan dengan jenis yang sama dapat memiliki nilai indeks glikemik yang berbeda bila diolah atau dimasak dengan cara yang berbeda. Pengolahan dapat mempengaruhi struktur dan komposisi zat yang dapat merubah daya serap. Selain itu juga terdapat variates dari tumbuhan juga yang mempengaruhi nilai indeks

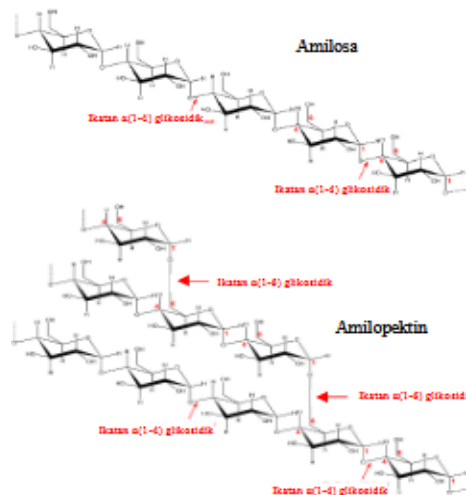
glikemik. Berikut faktor-faktor yang dapat mempengaruhi nilai indeks glikemik pada pangan, antara lain (Rusda, 2019) :

a) Kadar Serat Pangan

Kadar serat pangan memiliki hubungan yang negatif dengan nilai indeks glikemik pangan. Biji-bijian yang mengandung kadar serat pangan tinggi memiliki nilai indeks glikemik yang rendah. Serat dapat memperlambat laju makanan pada saluran pencernaan dan menghambat aktivitas enzim, sehingga proses pencernaan khususnya pati menjadi lambat dan respons glukosa darah pun akan lebih rendah. Serat pangan yang dapat mereduksi absorpsi glukosa adalah serat pangan larut. Serat larut memiliki fungsi untuk memperlambat pencernaan didalam usus dan memperlambat laju peningkatan glukosa darah (Arif *et al.*, 2013). Kandungan serat terutama *arabinoxylan* dan β -*glukan*, dapat meningkatkan viskositas di saluran pencernaan dan menghambat difusi enzim pencernaan menuju granula pati (Iversen *et al.*, 2022).

b) Kadar Amilosa dan Amilopektin

Amilosa dan amilopektin merupakan dua fraksi yang termasuk granula pati. Amilosa merupakan polimer rantai lurus glukosa yang dihubungkan oleh ikatan α -(1,4)-glikosidik, amilosa juga disebut sebagai fraksi terlarut. Amilopektin pada dasarnya mirip dengan amilosa tetapi memiliki ikatan α -(1,6)-glikosidik pada percabangannya dan disebut sebagai fraksi tidak larut. Amilopektin bersifat lebih rapuh dibandingkan amilosa (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 . Struktur Molekul Amilosa dan Amilopektin, dua polimer utama penyusun granula pati (Rozali, 2024)

Amilosa juga mempunyai ikatan hidrogen yang lebih kuat dibandingkan dengan amilopektin, sehingga lebih sukar dihidrolisis oleh enzim-enzim pencernaan. Struktur amilosa yang tidak bercabang membuat amilosa terikat lebih kuat sehingga sulit tergelatinisasi dan akibatnya sulit dicerna. Pangan yang memiliki proporsi amilosa lebih tinggi dibanding amilopektin akan memiliki nilai indeks glikemik yang lebih rendah (Rusda, 2019). Enzim pencernaan yang mampu menghidrolisis pati oleh air membentuk gula adalah enzim amilase. Enzim ini terdapat pada air ludah manusia dan pancreas. Enzim amilase dikategorikan sebagai endoenzim karena pemotongan pati dilakukan secara acak dari dalam (Wahyuni, 2015).

Pati gandum putih (*Triticum aestivum* L.) mengandung amilopektin dalam proporsi yang sangat tinggi, yaitu sekitar 75–80% dari total pati, dengan panjang rantai cabang yang relatif pendek sehingga mudah diakses dan dihidrolisis oleh enzim *α -amilase* secara cepat. Sebaliknya, pati gandum hitam (*Secale cereale* L.) juga mengandung amilopektin dalam proporsi serupa (sekitar 70–80%), namun rantai cabang amilopektinnya cenderung lebih panjang dan lebih padat, sehingga

lebih lambat dihidrolisis oleh enzim pencernaan (Iversen *et al.*, 2022). Selain itu, matriks serat gandum hitam yang kaya *arabinoxylan* dan beta-glukan melapisi granula pati dan secara fisik menghambat akses enzim amilase terhadap amilopektin, sehingga laju hidrolisis pati pada gandum hitam jauh lebih lambat dibandingkan gandum putih. Kondisi inilah yang menjadi salah satu dasar ilmiah mengapa produk berbasis gandum hitam secara konsisten menghasilkan respons glikemik yang lebih rendah dibandingkan produk gandum putih (Deleu *et al.*, 2020).

c) Daya Cerna Pati

Daya cerna pati adalah tingkat kemudahan suatu jenis pati untuk dihidrolisis oleh enzim pemecah pati menjadi unit yang lebih sederhana. Pati adalah karbohidrat utama yang ditemukan di alam dan merupakan sumber utama karbohidrat dalam makanan manusia. Secara alami, sebagian pati terdapat dalam plastida biji, akar, umbi, buah, daun, umbi, inti batang, dan rimpang tanaman hijau dalam bentuk granula. Senyawa utama penyusun granula pati adalah α -D-glukosa yang saling terhubung membentuk dua polimer dengan struktur dan sifat yang berbeda, yaitu amilosa dan amilopektin (Rozali, 2024). Pati merupakan bahan pangan utama yang akan dikonversi menjadi energi dalam tubuh manusia (Bojarczuk *et al.*, 2022). Konversi pati menjadi energi melalui proses yang panjang, yang dimulai dari proses hidrolisis pati menjadi glukosa. Hidrolisis atau pencernaan pati dilakukan oleh beberapa enzim terutama di dalam usus halus oleh enzim α -amilase, glukoamilase dan sukraseisomaltase. Hasil hidrolisis pati berupa glukosa akan diserap ke dalam darah untuk dibawa ke sel-sel tubuh dan selanjutnya diubah menjadi energi (Rozali, 2024).

Hidrolisis pati menjadi glukosa merupakan proses bertahap yang melibatkan serangkaian enzim pencernaan pada manusia yang bekerja secara berurutan. Tahap pertama dimulai di rongga mulut, di mana enzim α -amilase saliva (*ptyalin*) mulai memecah ikatan glikosidik α -1,4 secara acak dari dalam rantai amilosa dan amilopektin, menghasilkan fragmen-fragmen berupa dekstrin dan maltose (Lin *et al.*, 2012). Proses ini berlanjut di usus halus, di mana α -amilase pankreas bekerja lebih intensif memecah dekstrin menjadi maltosa, maltotriosa, dan oligosakarida rantai pendek. Tahap akhir terjadi di brush border epitel usus halus, di mana enzim maltase-glukoamilase memotong ikatan α -1,4 dari ujung rantai dan melepaskan unit glukosa bebas satu per satu, sementara sukrase-isomaltase berperan memotong ikatan percabangan α -1,6 pada amilopektin. Glukosa hasil hidrolisis kemudian diserap melalui *Sodium-Glucose Linked Transporter-1* (SGLT-1), yaitu protein transporter pada membran apikal enterosit yang mengangkut glukosa bersama ion natrium (Na^+) dari lumen usus ke dalam sel epitel usus halus ke dalam sirkulasi darah, menyebabkan kenaikan kadar glukosa darah postprandial yang menjadi dasar pengukuran indeks glikemik suatu pangan (Elferink *et al.*, 2020).

Pengukuran daya cerna pati secara *in vitro* mengacu pada metode Argyri *et al.* (2016) yang mensimulasikan tiga tahap utama pencernaan karbohidrat di saluran pencernaan bagian atas manusia. Tahap pertama adalah pencernaan lambung (*gastric phase*), di mana sampel roti diinkubasi bersama enzim pepsin dalam larutan buffer asetat pH 5,0 pada suhu 37°C. Pada tahap ini, pepsin berperan mendegradasi komponen protein yang membungkus granula pati (protein-starch matrix), sehingga granula pati menjadi lebih mudah diakses oleh

enzim amilase pada tahap berikutnya. Tahap kedua adalah pencernaan usus halus (*intestinal phase*), di mana sampel ditambahkan enzim α -amilase pankreas (pankreatin) dalam larutan buffer fosfat pH 6,9 pada suhu 37°C. Enzim α -amilase memecah ikatan glikosidik α -1,4 secara acak pada rantai amilosa dan amilopektin, menghasilkan dekstrin, maltosa, dan oligosakarida rantai pendek. Tahap ketiga adalah hidrolisis oleh enzim amiloglukosidase (*glucoamylase phase*), di mana amiloglukosidase memotong satu per satu unit glukosa dari ujung non-pereduksi rantai oligosakarida, sehingga menghasilkan glukosa bebas yang dapat diukur kadarnya. Pengambilan *aliquot* dilakukan pada menit ke-0, 30, 60, 90, dan 120 menit untuk mengamati kinetika pelepasan glukosa selama proses hidrolisis berlangsung (Argyri *et al.*, 2016)

Laju hidrolisis pati dipengaruhi oleh struktur fisik granula pati, rasio amilosa terhadap amilopektin, derajat gelatinisasi, serta kehadiran komponen lain seperti serat, protein, dan asam organik yang dapat menghambat aktivitas enzim α -amilase. Penghambatan α -amilase menyebabkan pati tidak terpecah secara efisien menjadi dekstrin dan maltosa, sehingga produksi glukosa bebas di usus halus pun melambat, luas area di bawah kurva (AUC) glukosa darah mengecil, dan nilai hidrolisis indeks (HI) serta *estimated glycemic index* (eGI) menurun (Demirkesen *et al.*, 2021).

d) Fermentasi Mikroba

Fermentasi melibatkan aktivitas mikroorganisme yang mampu mengubah struktur kimia dan fisik komponen penyusun adonan, khususnya pati dan serat pangan. Perubahan ini berdampak langsung pada penurunan laju pencernaan pati serta perlambatan pelepasan glukosa selama proses pencernaan, sehingga

menghasilkan pangan dengan nilai IG yang lebih rendah (Demirkesen *et al.*, 2021). Selama fermentasi, BAL menghasilkan asam organik terutama asam laktat dan asam asetat yang berperan menurunkan pH adonan. Kondisi asam ini menghambat aktivitas enzim α -amilase sehingga proses hidrolisis pati menjadi glukosa berjalan lebih lambat (De Angelis, 2007).

Pengaruh fermentasi terhadap pati (amilum) pada adonan roti gandum hitam terjadi melalui mikroba yaitu Bakteri Asam Laktat (BAL), khususnya *Lactiplantibacillus plantarum*, berperan penting dalam menurunkan nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) pangan melalui serangkaian mekanisme biokimia yang saling mendukung. Selama fermentasi, BAL memproduksi asam laktat sebagai metabolit utama dan asam asetat sebagai produk sampingan melalui jalur homofermentatif maupun heterofermentatif. Kedua asam organik ini menurunkan pH adonan secara signifikan, menciptakan lingkungan asam yang secara langsung menghambat aktivitas enzim α -amilase pankreas pada saat pencernaan berlangsung di usus halus (De Angelis, 2007). Asam laktat juga berinteraksi dengan fraksi protein gluten dalam matriks adonan, membentuk ikatan kompleks protein-pati yang mengurangi aksesibilitas enzim pencernaan terhadap granula pati. Selain itu, kondisi pH rendah akibat fermentasi BAL mendorong terjadinya retrogradasi amilosa, yaitu terbentuknya kembali struktur kristalin dari rantai amilosa yang menghasilkan pati resisten tipe 3 (RS3). Pati resisten ini tidak dapat dihidrolisis oleh enzim pencernaan normal sehingga tidak berkontribusi pada peningkatan kadar glukosa darah (Demirkesen *et al.*, 2021). Secara keseluruhan, aktivitas fermentasi *L. plantarum* menyebabkan penurunan laju hidrolisis pati

yang tercermin dari rendahnya nilai *Hydrolysis Index* (HI) dan eGI produk roti yang dihasilkan (Nurhayati *et al.*, 2019)

Khamir *Saccharomyces cerevisiae* berkontribusi dalam penurunan nilai eGI melalui mekanisme yang berbeda namun saling melengkapi dengan BAL. Selama fermentasi, *S. cerevisiae* menghasilkan enzim invertase yang menghidrolisis sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa. Monosakarida tersebut selanjutnya dimanfaatkan oleh khamir melalui jalur glikolisis untuk menghasilkan etanol dan karbondioksida (CO₂), sehingga kadar gula sederhana yang tersedia untuk diserap dalam produk akhir menjadi berkurang (Wang *et al.*, 2021). Produksi CO₂ yang intens selama fermentasi juga mengubah struktur fisik matriks adonan dengan membentuk jaringan pori-pori yang lebih rapat dan padat, sehingga menghambat akses enzim pencernaan terhadap granula pati di dalamnya (Khazalina, 2020). Di samping itu, metabolisme *S. cerevisiae* menghasilkan berbagai senyawa volatil seperti ester, aldehida, dan asam organik rantai pendek yang secara tidak langsung turut menghambat aktivitas enzim α -amilase selama proses pencernaan berlangsung (Wang *et al.*, 2021).

3.2.2 Metode Penentuan Indeks Glikemik

Metode penentuan indeks glikemik terbagi menjadi 2 yaitu metode *in vivo* dan *in vitro* (Rinaldi, 2019). Metode *in vivo* merupakan metode pengujian langsung pada manusia untuk mengukur respon glukosa darah setelah mengonsumsi pangan uji yang mengandung 50 gram karbohidrat tersedia. Respon ini dibandingkan dengan pangan acuan (biasanya glukosa murni atau roti putih), kemudian dihitung luas area di bawah kurva glukosa darah (*Area Under the Curve*/ AUC). (Ferrer *et al.*, 2011). Tahap pengujian yaitu sampel darah pertama

harus diambil tepat pada 15 menit setelah gigitan pertama sampel atau makanan uji. Pengambilan darah partisipan sebaiknya pada kapiler ujung jari karena dapat memberikan sensitivitas yang baik. Waktu pengambilan darah pada partisipan adalah puasa (menit-0), menit ke-15, 30, 45, 60, 90 dan menit ke- 120 setelah mulai mengonsumsi makanan uji (Kazemi *et al.*, 2020).

Metode *in vitro* dilakukan dengan menirukan sistem pencernaan pada manusia dengan menggunakan enzim-enzim yang bekerja pada sistem pencernaan dan mengukur kecepatan glukosa yang dilepaskan dalam tubuh manusia. Beberapa peneliti telah menggunakan metode secara *in vitro* terkait hidrolisis enzimatis pati untuk mengetahui dan mengukur bagaimana perkiraan respon glikemik darah *in vivo* (Argyri *et al.*, 2013). Kadar glukosa hasil hidrolisis pati dapat diukur menggunakan metode 3,5-dinitrosalisilat (DNS). Metode ini didasarkan pada reaksi antara gugus aldehid dari gula pereduksi, termasuk glukosa, dengan asam dinitrosalisilat yang menghasilkan kompleks berwarna jingga kemerahan. Intensitas warna yang terbentuk kemudian diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 540 - 575 nm, dan dibandingkan dengan kurva standar glukosa untuk menentukan konsentrasi glukosa yang terbentuk (Rinaldi, 2019).

Tahapan analisis *in vitro* dengan metode DNS secara umum yaitu penimbangan sampel roti, penambahan enzim α -amilase untuk mensimulasikan proses pencernaan pati, pengambilan *aliquot* pada waktu tertentu (0 - 120 menit), penghentian aktivitas enzim melalui pemanasan, dan pengukuran kadar gula pereduksi menggunakan reagen DNS. Data kadar glukosa yang diperoleh dari setiap waktu pengamatan kemudian digunakan untuk menghitung *Hydrolysis*

Index (HI) dan selanjutnya digunakan untuk memperkirakan nilai eGI (Sciarini *et al.*, 2017).

3.3 Roti

Roti merupakan jenis makanan yang mengandung karbohidrat dan terbuat dari tepung terigu (Hamidah *et al.*, 2019). Roti dikenal sebagai produk pangan berbasis adonan tepung. Selain itu, roti menjadi makanan praktis untuk sumber energi, sehingga roti terus menjadi bahan pangan yang sering dikonsumsi dalam kehidupan sehari-hari. Roti dapat diartikan sebagai pangan berbahan baku tepung terigu dengan pencampuran bahan lain sehingga membentuk adonan, kemudian difermentasi dengan ragi roti dan dipanggang dalam oven (Karki *et al.*, 2017). Tahap pembuatan roti terdiri dari empat tahap utama, yaitu pencampuran adonan, peragian (fermentasi), pengulenan, dan pemanggangan. Tahap pertama adalah proses pencampuran adonan dengan mengaduk, menarik dan membanting adonan berfungsi dalam menghasilkan gluten di dalam adonan sehingga memiliki sifat viskoelastis. Tahap kedua adalah peragian yang berfungsi untuk mengembangkan adonan roti. Mikroba pada tahap peragian akan mensintesis enzim yang kemudian digunakan untuk memproduksi CO₂ dari glukosa atau pati (Sitepu, 2019). Proses ketiga melibatkan pengulenan adonan, yang bertujuan untuk meratakan distribusi gelembung karbon dioksida yang terakumulasi di dalamnya (Munteanu *et al.*, 2019). Tahap terakhir adalah pemanggangan. Pemanggangan roti dilakukan di dalam oven dengan suhu 180 °C selama 20 menit (Karki *et al.*, 2017).

Roti adalah jenis makanan yang volumenya dipengaruhi gelembung gas yang terbentuk oleh ragi (*yeast*) sebagai hasil fermentasi. Umumnya roti memiliki karakteristik roti meliputi warna, tekstur, rasa, dan aroma (Arum, 2020). Roti

tawar merupakan jenis roti yang banyak dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Menurut Data Statistik Konsumsi Pangan, konsumsi roti pada tahun 2018 mencapai 19.085 bungkus, sedangkan pada tahun 2014 sebesar 3.244 bungkus. Berdasarkan data tersebut, dapat diketahui bahwa kebutuhan roti mengalami peningkatan dari tahun ke tahun yang menyebabkan roti memiliki banyak variasi dari segi rasa maupun bahan yang digunakan sehingga menghasilkan nilai gizi yang berbeda. Umumnya, roti tawar mengandung karbohidrat sebesar 50g, protein 8g, lemak 1,2g, serat 5,1g, energi 248kal, dan air 40g (Sachriani, 2021).

Roti merupakan makanan berbahan dasar biji-bijian dan merupakan bagian dari pola makan sehari-hari yang terdiri dari karbohidrat, protein, serat pangan, dan vitamin yang cukup (Demirkesen *et al.*, 2021). Serat pangan merupakan salah satu asupan penting bagi manusia (Sachriani, 2021). Roti gandum biasa secara umum dikategorikan sebagai makanan dengan nilai indeks glikemik (IG) yang tinggi, sebuah kondisi yang dipertimbangkan kurang ideal bagi penderita diabetes (Muflihati, 2017). Roti termasuk kelompok bahan pangan dengan indeks glikemik (IG) 70 dalam kategori sedang dan dapat dijadikan sebagai kontrol dalam penelitian indeks glikemik (Hamidah *et al.*, 2019). Tingginya IG pada roti gandum biasa disebabkan oleh rendahnya kandungan serat pangan. Berbagai inovasi formulasi telah dikembangkan untuk menghasilkan roti dengan nilai fungsional yang lebih tinggi dan IG yang lebih rendah. Perlakuan yang terbukti efektif dalam menurunkan respons glukosa darah meliputi penggunaan *rye grain* (gandum hitam), penambahan *Resistant Starch* (RS), dan fermentasi sourdough. Penggunaan *rye grain* (gandum hitam), menunjukkan respons gula postprandial

yang paling rendah, yang dikaitkan dengan kandungan seratnya yang lebih tinggi dibandingkan gandum biasa (Muflihathi, 2017).

3.4 Gandum Hitam

Gandum hitam (*Secale cereale L.*) merupakan sereal terpenting kedua setelah gandum putih (*Triticum aestivum L.*) (Litwinek *et al.*, 2022). Komponen utama biji-bijian ini adalah pati (57,1 - 65,6%), serat (14,7 - 20,9%), protein (9,0 - 15,4%), dan abu (1,8 - 2,2%) (Dziki, 2022). Gandum termasuk juga gandum hitam merupakan bagian dari kelompok biji-bijian yang merupakan bahan pangan utama manusia. Sebagaimana dalam Al Qur'an, Allah swt berfirman Al An'am ayat 99 adalah sebagai berikut :

وَهُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ نَبَاتَ كُلِّ شَيْءٍ فَأَخْرَجْنَا مِنْهُ خَضِرًا نُخْرِجُ مِنْهُ حَبًّا مُتَرَاكِبًا وَمِنَ النَّخْلِ مِنْ طَلْعِهَا قِنْوَانٌ دَانِيَةٌ وَجَنَّاتٍ مِنْ أَعْنَابٍ وَالزَّيْتُونَ وَالرُّمَّانَ مُشْتَبِهًا وَغَيْرَ مُتَشَابِهٍ انْظُرُوا إِلَى ثَمَرِهِ إِذَا أَثْمَرَ وَيَنْعِهِ إِنَّ فِي ذَلِكَُمْ لَآيَاتٍ لِّقَوْمٍ يُؤْمِنُونَ

٩٩

Artinya : “Dan Dialah yang menurunkan air dari langit, lalu Kami tumbuhkan dengan air itu segala macam tumbuh-tumbuhan, maka Kami keluarkan dari tumbuh-tumbuhan itu tanaman yang menghijau. Kami keluarkan dari tanaman yang menghijau itu butir yang banyak; dan dari mayang kurma mengurai tangkai-tangkai yang menjulai, dan (Kami tumbuhkan pula) kebun-kebun anggur, zaitun, dan delima yang serupa (bentuk dan warnanya) tetapi berlainan (rasanya). Perhatikanlah buahnya di waktu pohonnya berbuah dan (perhatikan pula) kematangannya. Sesungguhnya pada yang demikian itu terdapat tanda-tanda (kekuasaan Allah) bagi orang-orang yang beriman.” (QS. Al-An'am : 99).

Tafsir Al Mishbah (Shihab, 2002) menggambarkan kekuasaan Allah dalam menciptakan berbagai jenis tumbuhan-tumbuhan. Lafadz (حَبًّا) yang berarti butir dalam ayat ini menggambarkan biji-bijian yang menjadi sumber kehidupan manusia. Allah menurunkan air dari langit untuk menumbuhkan berbagai tanaman, termasuk biji-bijian yang menghasilkan butir-butir yang banyak, yang

kemudian dimanfaatkan manusia sebagai sumber pangan utama. Ayat ini bukan sekadar menggambarkan keindahan ciptaan Allah, melainkan juga mengandung pesan bagi manusia agar memperhatikan proses tumbuhnya bahan makanan dari air hujan hingga menjadi bahan pangan bernilai gizi. Gandum merupakan salah satu karunia Allah yang ditumbuhkan dari bumi dan memiliki manfaat besar bagi kehidupan manusia sebagai sumber energi dan serat pangan.

Gandum hitam memiliki sejumlah kelebihan yang menjadikannya lebih unggul sebagai bahan pangan fungsional dibandingkan dengan gandum putih (*Triticum aestivum* L.). Dari segi kandungan mineral, gandum hitam mengandung zat besi (Fe), magnesium (Mg), seng (Zn), mangan (Mn), dan fosfor (P) dalam jumlah yang lebih tinggi dibandingkan gandum putih. Mineral-mineral tersebut berperan penting dalam berbagai proses metabolisme tubuh, termasuk pembentukan hemoglobin, aktivitas enzim, serta pemeliharaan fungsi sistem saraf dan imun (Saeed *et al.*, 2025). Selain itu, gandum hitam lebih kaya akan vitamin B kompleks, terutama tiamin (B1), riboflavin (B2), niasin (B3), dan folat (B9), yang berperan dalam metabolisme energi dan pembentukan sel darah merah (Dziki, 2022).

Gandum hitam mengandung komponen serat yang terdiri dari fruktan dan β -glukan (Koj & Pecjz, 2023). Menurut Zannini *et al.*, (2022) serat kompleks yang memberikan beragam manfaat kesehatan yang diatur secara ketat oleh struktur kimia yaitu senyawa *Arabinoxylan*. Gandum hitam memiliki senyawa Arabinoksilan yang dapat ditemukan dalam berbagai kelompok biji bijian, seperti gandum, jelai, atau jagung. Senyawa ini merupakan komponen utama serat pangan dan kandungannya mencapai sekitar 64% dari total jumlah polisakarida

(Dynkowska, 2020). Terdapat senyawa *Arabinoxylan* yang terkandung dalam gandum hitam, telah terbukti memberikan dampak positif bagi kesehatan. Senyawa ini memiliki efek imunomodulator, membantu menurunkan kadar kolesterol, meringankan gejala diabetes tipe 2 dan meningkatkan penyerapan beberapa mineral (Mendis & Simsek, 2014).

Gandum hitam memiliki kandungan serat pangan tertinggi di antara sereal dan biasanya mencapai 20% dari bahan kering dan lebih, sedangkan gandum putih, oat, dan barley memiliki sekitar 10-15%. Meskipun kandungan serat nya berbeda tergantung pada varietas dan budidaya. Kandungan serat pangan total pada gandum hitam relatif lebih tinggi dibandingkan gandum putih, dengan jumlah arabinoksilan sekitar 50% lebih banyak. Selain itu, sebagian besar arabinoksilan pada gandum hitam berada dalam bentuk larut air (Iversen *et al.*, 2022). Gandum hitam memiliki senyawa *Arabinoxylan* larut air yang dapat meningkatkan viskositas pencernaan, sehingga memperlambat kerja enzim amilase dalam memecah pati menjadi glukosa. Kondisi ini menyebabkan pelepasan glukosa ke dalam darah berlangsung lebih lambat dan pati lebih sulit dicerna (Iversen *et al.*, 2022).

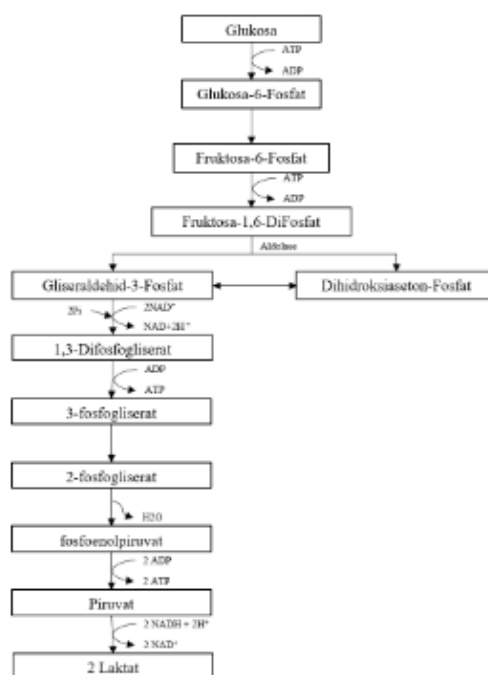
Roti gandum hitam memiliki indeks glikemik yang relatif rendah, sehingga keberadaan serat larut di dalamnya berperan dalam membantu menurunkan kadar glukosa darah (Lappi *et al.*, 2014). Roti gandum hitam memiliki faktor yang paling dominan dalam memengaruhi nilai indeks glikemik adalah kandungan serat pangan terutama *arabinoxylan* dan β -glukan, yang berperan dalam meningkatkan viskositas dan menurunkan laju pencernaan pati (Deleu *et al.*, 2020). Roti gandum hitam yang berasal dari tepung gandum hitam

yang memiliki kandungan serat makanan yang tinggi dan senyawa bioaktif sehingga terbukti menunjukkan beberapa efek menguntungkan bagi kesehatan. Tepung ini memiliki kandungan senyawa bioaktif seperti asam fenolik melalui fermentasi mikroba (Dziki, 2022).

3.5 Bakteri Asam Laktat

Bakteri asam laktat adalah salah satu bakteri yang berkontribusi besar dalam dunia pangan. Selama ribuan tahun bakteri asam laktat telah digunakan sebagai pangan fungsional, pengawet alami dari suatu produk pangan fermentasi (Tulasi *et al.*, 2024). Bakteri asam laktat (BAL) memiliki gula yang menjadi sumber nutrisi utama yang digunakan dalam 2 proses metabolisme untuk menghasilkan asam laktat. BAL memecah glukosa dan fruktosa melalui jalur glikolisis homofermentatif (Gambar 2.3), sehingga menghasilkan asam laktat sebagai produk akhir fermentasi (Savitry, 2018).

Bakteri asam laktat memiliki kandungan asam - asam organik yaitu asam asetat dan asam laktat. Selain menghasilkan asam laktat, fermentasi oleh BAL juga menghasilkan senyawa lain seperti asam asetat, eksopolisakarida, dan senyawa antimikroba. Menurut Wang *et al.*, (2021) EPS (*Eksopolisakarida*) memiliki fungsi biologis seperti perlindungan sel bakteri, pembentukan biofilm, dan peningkatan viskositas adonan. BAL penghasil *eksopolisakarida* (EPS) yang paling menonjol adalah *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Bifidobacterium*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Enterococcus* dan *Weissella* (Silva *et al.*, 2019). Jenis Bakteri Asam Laktat (BAL) yang umum digunakan antara lain *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus fermentum*, *Lactobacillus brevis*, *Leuconostoc mesenteroides* (Penido *et al.* 2018)



Gambar 2.3 Jalur homofermentatif fermentasi glukosa pada bakteri asam laktat (Hendarto, 2019)

Bakteri Asam Laktat aman bagi manusia karena produk metabolitnya alami dan tidak beracun, sehingga dikategorikan sebagai *Generally Recognised as Safe* (GRAS) oleh lembaga keamanan pangan serta memiliki berbagai manfaat di bidang pangan, salah satunya dalam proses pembuatan roti (Breton *et al.*, 2020; Aini *et al.*, 2021). Bakteri Asam Laktat (BAL) membentuk asam-asam organik yaitu asam laktat dan asam asetat yang dapat menyebabkan penurunan pH adonan roti. Kondisi asam ini dapat menghambat aktivitas enzim α -amilase yang berperan dalam hidrolisis pati menjadi glukosa. Selain itu, asam laktat juga dapat membentuk kompleks dengan molekul pati sehingga menurunkan ketersediaan pati untuk dicerna oleh enzim pencernaan. Akibatnya, laju pencernaan pati menjadi lebih lambat dan berdampak pada penurunan nilai indeks glikemik roti (Demirkesen *et al.*, 2021).

3.6 Khamir *Saccharomyces cerevisiae*

Khamir *Saccharomyces cerevisiae* merupakan mikroorganisme eukariotik. Mikroorganisme eukariotik yang biasa digunakan dalam industri makanan terutama sebagai starter fermentasi dalam pembuatan roti dan produksi minuman beralkohol. Khamir *Saccharomyces cerevisiae* mampu memfermentasi gula menjadi alkohol dan karbon dioksida (Bitrus *et al.*, 2020), yang banyak dimanfaatkan sebagai ragi dalam pembuatan roti. Selain memproduksi alkohol dan karbon dioksida, proses fermentasi juga menghasilkan senyawa volatil yang memberikan cita rasa dan aroma khas pada roti (Buratti & Benedetti, 2016). Dalam proses pembuatan roti, *Saccharomyces cerevisiae* berperan sebagai penghasil gas CO₂ yang dapat mengembangkan adonan agar bentuk roti menjadi mengembang dan berpori-pori (Puspita, 2020).

Khamir yang umum terdapat dalam ragi roti yaitu golongan khamir *Saccharomyces cerevisiae*. Fungsi utama ragi dalam pembuatan roti adalah sebagai pengembang adonan. Ragi memiliki beberapa enzim yaitu protease, lipase, invertase, maltase dan zymase. Protease mengkonversi protein dalam tepung menjadi senyawa nitrogen yang dapat digunakan oleh sel khamir. Lipase mengkonversi lemak menjadi asam lemak dan gliserin. Invertase mengkonversi sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa. Maltase mengkonversi maltosa dan zymase mengkonversi glukosa menjadi alkohol dan karbondioksida (Kusnedi, 2021). Ragi melalui proses fermentasi akan menggunakan dan merombak gula pada tepung menghasilkan gas karbondioksida dan alkohol. Fermentasi ragi terjadi selama *proofing* adonan roti. *Proofing* adalah waktu yang dibutuhkan oleh adonan untuk mengembang sebelum adonan roti dipanggang. Gas karbondioksida selama

fermentasi dan proofing akan terperangkap pada adonan roti yang membuat adonan mengembang sehingga adonan roti menjadi empuk dan mudah untuk dibentuk (Sari *et al.*, 2024). Enzim invertase berperan penting dalam penyediaan gula selama fermentasi adonan roti. Aktivitas invertase mempercepat penguraian sukrosa menjadi gula sederhana untuk menghasilkan gas CO₂ dan etanol, sehingga pada akhir fermentasi kandungan gula mudah dicerna dalam roti berkurang. Kondisi ini berkontribusi terhadap penurunan indeks glikemik (Wang *et al.*, 2021).

3.7 Fermentasi BAL dan Khamir *Saccharomyces cerevisiae* terhadap Indeks Glikemik

Fermentasi menggunakan Bakteri Asam Laktat dan *Saccharomyces cerevisiae* merupakan salah satu mekanisme interaksi dalam penurunan pH dan efektif dalam menurunkan indeks glikemik (IG) produk pangan khususnya roti. Bakteri asam laktat termasuk bakteri yang mengandung asam organik, seperti asam laktat dan asam asetat yang diproduksi untuk menurunkan indeks glikemik (IG). Asam asetat terkait dengan keterlambatan pengosongan lambung, sedangkan asam laktat menginduksi interaksi antara pati dan gluten selama pemanggangan adonan dan mengurangi ketersediaan pati. Kondisi asam ini dapat menghambat aktivitas enzim α -amilase yang berperan dalam hidrolisis pati menjadi glukosa (Demirkesen *et al.*, 2021).

Menurut Afifah dkk., (2020) menyatakan kondisi asam organik selama fermentasi dapat memperlambat kerja enzim amilase dalam mencerna pati, sehingga pelepasan glukosa menjadi lebih lambat. Aktivitas BAL dalam fermentasi adonan dapat menurunkan pH sehingga terbentuk pati resisten

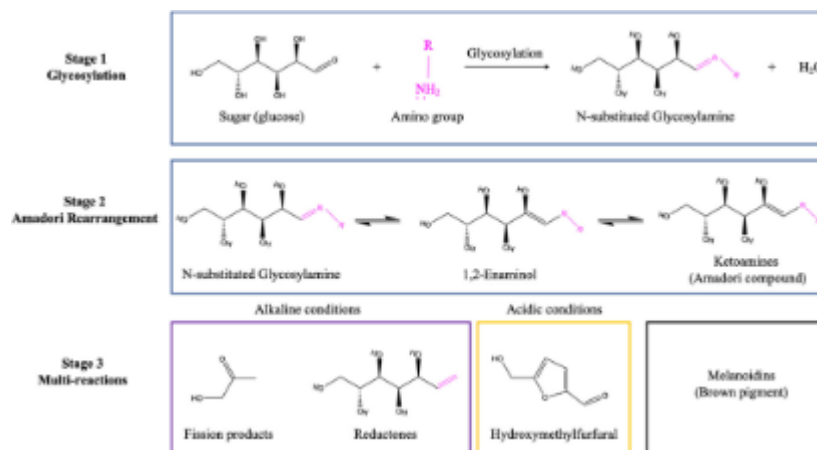
(*resistant starch/ RS*) yang bersifat lebih sulit dicerna oleh enzim pencernaan. Kombinasi mekanisme ini berkontribusi dalam memperlambat hidrolisis pati dan menurunkan nilai indeks glikemik (IG) produk pangan hasil fermentasi (Demirkesen *et al.*, 2021). *Resistant starch* atau pati resisten merupakan pati yang berada di dalam saluran pencernaan manusia dan tidak dapat diserap oleh usus halus. Keberadaan *resistant starch* memiliki banyak manfaat, diantaranya meningkatkan viskositas pencernaan, mampu terfermentasi di dalam usus besar, mampu mengikat molekul organik, dan meningkatkan kemampuan dalam mengikat air. Manfaat lain *resistant starch* adalah mampu menurunkan respon glukosa sehingga menghasilkan indeks glikemik yang rendah (Muflihati, 2017).

Selain BAL, khamir *Saccharomyces cerevisiae* juga berperan penting dalam proses fermentasi adonan. Khamir ini menghasilkan enzim invertase yang menguraikan sukrosa menjadi gula sederhana, kemudian di fermentasi menjadi gas CO₂ dan etanol yang membantu pengembangan adonan. Proses fermentasi kombinasi selain berfungsi menghasilkan volume dan tekstur roti, tetapi juga dapat menurunkan kadar gula yang mudah dicerna sehingga berpotensi menurunkan indeks glikemik (Wang *et al.*, 2021). Penelitian Scazzina *et al.*, (2009) menyatakan bahwa roti yang difermentasi menggunakan *S. cerevisiae* dan bakteri asam laktat (BAL) menghasilkan respon glukosa pasca makan yang lebih rendah dibandingkan roti yang hanya menggunakan ragi komersial biasa. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi tersebut tidak hanya berperan sebagai pengembang adonan saja, tetapi juga berfungsi dalam membentuk sifat fungsional pangan yang mendukung pengendalian kadar glukosa darah.

3.8 Fermentasi BAL dan Khamir *Saccaromyces cerevisiae* terhadap Kualitas Roti

Fermentasi BAL dan khamir berpengaruh juga terhadap kualitas roti. Kualitas roti meliputi volume, aroma, warna, rasa dan tekstur yang menggunakan uji organoleptik (Nawika, 2017). Khamir *Saccaromyces cerevisiae* mampu memfermentasi gula menjadi alkohol dan karbon dioksida (Bitrus *et al.*, 2020), yang banyak dimanfaatkan sebagai ragi dalam pembuatan roti. Selain memproduksi alkohol dan CO₂ proses fermentasi juga menghasilkan senyawa volatil yang memberikan cita rasa dan aroma khas pada roti (Buratti & Benedetti, 2016). Penambahan ragi dalam jumlah besar akan meningkatkan produksi CO₂ yang dapat memperbesar daya kembang dan menghasilkan roti yang lebih empuk. Aroma dan rasa yang khas pada roti berasal dari proses aktivitas khamir yang mengubah senyawa-senyawa seperti asam, aldehida, dan ester (Sitepu, 2019). BAL berperan menghasilkan asam organik seperti asam laktat dan asam asetat yang dapat menurunkan pH adonan, memperkuat struktur gluten, serta senyawa volatil yang memberikan cita rasa dan aroma pada roti fermentasi (Ganzle, 2014).

Uji organoleptik dilakukan untuk mengetahui tingkat kesukaan konsumen terhadap aroma, tekstur, rasa, warna, dan kesukaan (Fransiska, 2021). Timbulnya aroma pada roti disebabkan karena terbentuknya senyawa yang mudah menguap sebagai reaksi karena kinerja dari enzim-enzim pada khamir. Karakteristik warna pada roti dapat ditentukan melalui proses baking yang dimana akibat adanya reaksi maillard (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Reaksi Maillard (Cao et al., 2023)

Reaksi *Maillard* adalah suatu reaksi pencoklatan atau browning non enzimatis yang disebabkan oleh reaksi gula pereduksi dengan asam amino yang menghasilkan warna kecoklatan (Paramita dkk., 2022). Penggunaan gula dalam pembuatan roti berfungsi untuk memberi rasa manis pada adonan dan sebagai substrat khamir (Sitepu, 2019). Penelitian Ridhani dan Aini (2021) mengungkapkan bahwa gula bukan hanya pemanis, tetapi juga berperan penting dalam menciptakan warna khas roti. Gula bereaksi melalui dua proses, yaitu reaksi Maillard dan karamelisasi. Reaksi *Maillard* menghasilkan pigmen melanoidin coklat melalui mekanisme yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. sementara proses karamelisasi mengakibatkan degradasi gula dan membentuk warna kecoklatan pada roti (Sitepu *et al.*, 2019).

Pengujian organoleptik dapat menggunakan pendekatan hedonik (kesukaan), yang melibatkan panelis atau konsumen. Panelis dibedakan menjadi dua kategori yaitu panelis standar yang berjumlah 6 orang dan panelis non-standar yang berjumlah 30 orang. Panelis standar merupakan individu yang memiliki tingkat kepekaan tinggi terhadap atribut mutu produk serta memiliki pengetahuan dalam melakukan penilaian organoleptik. Sebaliknya, panelis non-standar adalah

individu yang tidak memiliki pengetahuan khusus dalam melakukan penilaian organoleptik (BSN, 2006).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa terdapat nilai IG menggunakan BAL dan khamir, roti sourdough gandum putih (*wholemeal*) menghasilkan respons glikemik yang lebih rendah ($\pm 53,7$) dibandingkan roti gandum putih biasa yang menghasilkan respons glikemik yang lebih tinggi (± 72), karena pada fermentasi kombinasi menghasilkan asam organik dan pati resisten lebih tinggi serta menghasilkan berbagai senyawa volatil seperti asam organik, ester, dan aldehida yang memberikan aroma dan cita rasa pada roti sourdough. Hasil serupa ditunjukkan terdapat roti sourdough memiliki nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) yang menghasilkan lebih rendah dibandingkan roti putih, sehingga fermentasi sourdough dari isolat tunggal BAL dan khamir *saccharomyces cerevisiae* mampu menurunkan pH dan mengubah struktur pati sehingga memperlambat pelepasan glukosa serta membuktikan dapat menurunkan eGI (± 30). Selain itu roti berbasis gandum yang difermentasi dengan BAL dan khamir ini memiliki tekstur dan sifat sensoris yang lebih kompleks (De Angelis, 2007; Demirkesen *et al*, 2021).

3.9 Integrasi Sains dan Islam tentang Mikroorganisme dan Fermentasi Pangan

Integrasi antara sains dan islam memiliki keterkaitan dalam fenomena alam dan kehidupan. Sains menjelaskan berbagai proses yang melibatkan makhluk hidup dengan segala peran nya. Islam mendorong umatnya untuk meneliti ciptaan Allah SWT sebagai bentuk pengamalan ilmu yang bermanfaat

bagi kehidupan manusia. Hubungan antara perspektif sains dan Al Qur'an mengenai penelitian ini adalah sebagai berikut : (Tabel 2.2)

Tabel 2. 2 Perbandingan Pandangan Sains dan Al Qur'an tentang Mikroorganisme dan Fermentasi Pangan

Materi	Pandangan Sains	Pandangan Al Qur'an
Mikroorganisme (BAL & Khamir)	Mikroorganisme merupakan makhluk mikroskopis yang hidup di berbagai lingkungan. BAL termasuk bakteri Gram positif non patogen, sedangkan khamir termasuk fungi bersel tunggal yang digunakan dalam fermentasi pangan (Vivek & Venkitasamy, 2023).	Mikroorganisme merupakan ciptaan Allah dalam perumpamaan makhluk sekecil nyamuk bahkan lebih kecil lagi. Ayat ini menunjukkan kebesaran Allah dalam menciptakan makhluk yang sangat kecil dan mengandung kebesaran Nya (QS. Al Baqarah : 26).
Manfaat BAL dan Khamir	BAL dan khamir bekerja sama dalam fermentasi yaitu menghasilkan asam organik, CO ₂ , dan senyawa volatil yang dapat meningkatkan cita rasa dan nilai gizi pangan (Wang <i>et al</i> , 2021).	BAL dan khamir bekerja sinergi dalam fermentasi yang mencerminkan prinsip <i>ta'āwun 'alal birri wat-taqwā</i> (tolong menolong dalam kebaikan). Kerja sama sesama mikroba menjadi simbol keberkahan ciptaan Allah (Al Maidah : 2).
Biji – bijian (Roti Gandum Hitam)	Gandum hitam (<i>Secale cereale L.</i>) merupakan kelompok biji-bijian	Allah menurunkan air dan menumbuhkan tumbuhan dan kelompok

	yang mengandung serat biji-bijian yang banyak. pangan yang berperan Ayat ini dalam menurunkan menggambarkan kadar glukosa darah kekuasaan Allah dalam serta meningkatkan menumbuhkan sumber kesehatan pencernaan. pangan manusia dari air hujan (QS. Al An'am : 99). (Lappi <i>et al.</i> , 2014).
Manfaat Roti Gandum Hitam Sebagai Pangan Fermentasi	Gandum hitam menjadi Gandum hitam pangan fermentasi merupakan bahan menghasilkan roti yang pangan penghasil roti bermanfaat menurunkan hasil fermentasi BAL indeks glikemik dan dan khamir yaitu memperbaiki kualitas termasuk pangan <i>halalan</i> dan cita rasa roti <i>thayyiban</i> karena dari (Demirklesen <i>et al.</i> , 2021). bahan pangan alami serta menyehatkan (QS. Al Baqarah : 168).

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini bersifat kualitatif dengan uji kualitas organoleptik roti gandum hitam dan kuantitatif uji *estimated Glycemic Index* (eGI) dengan pengukuran secara *in vitro*. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan faktor variasi konsentrasi kombinasi khamir 1,5%, 2%, dan 2,5% (w/w) dan Bakteri Asam Laktat 2%, 3%, dan 4% (v/w) dengan 3 kali ulangan. Desain penelitian dapat dilihat seperti pada (Tabel 3.1). Selain itu, penelitian ini menggunakan kontrol negatif, di mana adonan roti tidak ditambahkan Bakteri Asam Laktat (BAL) dan khamir.

Tabel 3.1 Desain Penelitian RAL dengan faktor variasi konsentrasi kombinasi BAL dan Khamir

Faktor		Konsentrasi Khamir		
Konsentrasi BAL		Y ₁	Y ₂	Y ₃
	L ₁	L ₁ Y ₁	L ₁ Y ₂	L ₁ Y ₃
	L ₂	L ₂ Y ₁	L ₂ Y ₂	L ₂ Y ₃
	L ₃	L ₃ Y ₁	L ₃ Y ₂	L ₃ Y ₃

Keterangan :

L ₁ = Konsentrasi BAL 2%	Y ₁ = Konsentrasi Khamir 1,5%
L ₂ = Konsentrasi BAL 3%	Y ₂ = Konsentrasi Khamir 2%
L ₃ = Konsentrasi BAL 4%	Y ₃ = Konsentrasi Khamir 2,5%

4.2 Variabel Penelitian

4.2.1 Variabel bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah konsentrasi bakteri asam laktat *Lactiplantibacillus plantarum* yaitu (2%, 3%, dan 4%) dan Khamir *Saccharomyces cerevisiae* (1,5%, 2%, dan 2,5%).

4.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) secara *in vitro* dan kualitas roti menggunakan uji organoleptik roti gandum hitam (warna, aroma, rasa dan tekstur).

4.2.3 Variabel kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah waktu fermentasi selama 720 menit pada saat membuat roti, jenis tepung yaitu roti gandum hitam merk *Bob's Red Mill*, metode uji eIG (*estimated indeks glikemik*), kualitas organoleptik roti, pH awal dan akhir adonan dan waktu pemanggangan selama 30 menit dan suhu oven 180° C.

4.3 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember sampai Mei 2026 di Laboratorium Mikrobiologi, Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang untuk peremajaan dan perbanyak bakteri asam laktat (BAL) *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccharomyces cerevisiae* dan Laboratorium Genetika Molekuler untuk menguji nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) metode *in vitro*.

4.4 Alat dan Bahan Penelitian

4.4.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Laminar Air Flow* (LAF), autoklaf, water bath shaker, inkubator, hotplate, sentrifuge, timbangan analitik, timbangan digital, oven listrik, mixer, erlenmeyer 1000 ml, erlenmeyer 500, erlenmeyer 250 ml, Erlenmeyer 50 ml, batang pengaduk, tabung eppendorf 15 ml, cawan petri, tabung reaksi, rak tabung reaksi, beaker glass, penggaris, kertas kue, aluminium foil, kantung plastik, tisu, plastik warp, kertas label, jarum

ose, bunsen, mikropipet, blue tipe, toples, blender, inkubator shaker, pH meter, sentrifuge, spektrofotometer UV-Vis, dan kamera.

4.4.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Isolat khamir *Saccharomyces cerevisiae*, bakteri asam laktat (BAL) *Lactiplantibacillus plantarum*, tepung gandum hitam (*Bob's Red Mill*), aquades steril, alkohol 70%, media *Yeast Malt Broth* (YMB), media *Yeast Malt Extract Agar* (YMEA), media *Yeast Peptone Glucose* (YPG), media *De Mann Rogosa and Sharpe Agar* (MRSA), media *De Mann Rogosa and Sharpe Broth* (MRSB), media pengembangan adonan roti (gula, garam, tepung terigu, margarin), enzim amilase, pepsin, glukamilase, HCl buffer pH 1,5, NaOH 0,1 N, sodium asetat buffer pH 6,9, reagen DNS dan larutan glukosa standar.

4.5 Prosedur Penelitian

4.5.1 Sterilisasi Alat Dan Bahan

Proses sterilisasi terhadap alat dan bahan dilakukan menggunakan autoklaf dengan cara mengisi autoklaf terlebih dahulu menggunakan akuades. Alat dan bahan yang akan disterilkan dibungkus menggunakan kertas atau plastik, kemudian disusun di dalam rak atau wadah autoklaf. Setelah itu, autoklaf ditutup rapat dan disetel pada suhu 121°C dengan tekanan 15 psi selama 15 menit (Istini, 2020).

4.5.2 Pembuatan Media

a) Media Yeast Malt Extract Agar (YMEA)

Pembuatan media YMEA sebanyak 1000 ml melibatkan beberapa bahan dengan komposisi sebagai berikut: yeast extract 3 g/L, malt extract 3 g/L, pepton 5 g/L, glukosa 10 g/L, dan microbial agar 20 g/L. Semua bahan tersebut

dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang berisi 1000 ml aquades. Selanjutnya, larutan media tersebut diaduk secara merata menggunakan magnetic stirrer dan dipanaskan di atas hotplate. Setelah homogen, mulut erlenmeyer ditutup dengan kasa dan kapas sebelum media tersebut disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit (Lata *et al.*, 2023)

b) Media Yeast Malt Broth (YMB)

Pembuatan media YMB sebanyak 1000 ml menggunakan beberapa bahan dengan komposisi sebagai berikut: yeast extract 3 g/L, malt extract 3 g/L, pepton 5 g/L, dan glukosa 10 g/L. Semua bahan tersebut dimasukkan ke dalam Erlenmeyer berisi 1000 ml aquades (Widiastutik & Alami, 2014). Larutan media diaduk secara merata menggunakan magnetic stirrer dan dipanaskan di atas hotplate. Setelah larutan homogen, mulut erlenmeyer ditutup dengan kasa dan kapas sebelum media disterilisasi di autoklaf dengan suhu 121°C selama 15 menit.

c) Media Yeast Peptone Glucose (YPG)

Pembuatan media YPG sebanyak 1000 ml meliputi bahan-bahan yaitu 20 g glukosa, 5 g pepton, dan 3 g yeast extract. Semua bahan dicampurkan ke dalam erlenmeyer yang berisi 1000 ml aquades. Setelah itu, larutan dimasukkan ke dalam tabung erlenmeyer dan diaduk hingga homogen. Media yang sudah homogen kemudian ditutup dengan kapas dan kasa, lalu ditambahkan 20 µl antibiotik Sodium DL-Lactose sebagai antibakteri di dalam laminar air flow (LAF). Sterilisasi dilakukan menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit (Nisaa, 2020).

d) Media deMan Rogosa and Sharpe Agar (MRSA)

Pembuatan media MRS Agar seberat 12.8 g dengan komposisi sebagai berikut pepton, ekstrak daging sapi, ekstrak ragi, dekstrosa, tween 80, ammonium sitrat, magnesium sulfat, mangan sulfat, dipotassium sulfat, dan sodium asetat (Motumona, 2025). Semua bahan tersebut dilarutkan dalam Erlenmeyer yang telah diisi dalam 200 ml aquades. Erlenmeyer yang berisi media kemudian dihomogenkan dengan menggunakan magnetic stirrer sambil dilakukan pemanasan di atas hot plat agar mempercepat kelarutan. Setelah itu, MRS Agar disterilisasi dalam autoklaf dengan suhu 121°C dan tekanan 1 atm selama 15 menit (Zahro, 2014).

e) Media deMan Rogosa and Sharpe Broth (MRSB)

Pembuatan media MRSB seberat 13,75 g dengan komposisi pepton, ekstrak daging, ekstrak ragi, glukosa, Tween 80, ammonium sitrat, sodium asetat, magnesium sulfat, mangan sulfat, dan dipotassium fosfat (Motumona, 2025). Semua bahan tersebut dilarutkan dalam Erlenmeyer yang telah diisi dalam 250 ml aquades. Erlenmeyer yang berisi media kemudian dihomogenkan dengan menggunakan magnetic stirrer sambil dilakukan pemanasan di atas hotplat agar mempercepat kelarutan. Setelah itu, MRSB disterilisasi dalam autoklaf dengan suhu 121°C dan tekanan 1 atm selama 15 menit (Zahro, 2014)

4.5.3 Peremajaan Isolat

a) Peremajaan Isolat Khamir

Peremajaan isolat khamir dilakukan secara aseptik di dalam *Laminar Air Flow* (LAF). Sebanyak 1 ose kultur isolat khamir diinokulasikan ke media YMEA menggunakan teknik streak plate. Kultur tersebut kemudian diinkubasi selama 48

jam pada suhu ruang sekitar 28°C. Tujuan inokulasi pada media agar YMEA adalah untuk merevitalisasi isolat agar menjadi aktif kembali. Proses peremajaan isolat dianggap berhasil apabila isolat tumbuh dengan baik di permukaan media agar (Maya & Alami, 2019).

b) Peremajaan Isolat Bakteri Asam Laktat

Peremajaan isolat bakteri asam laktat dilakukan dengan mengambil satu koloni bakteri yang diisolasi dari buah apel menggunakan ose. Koloni tersebut kemudian dioleskan pada media MRSA di dalam cawan petri menggunakan teknik streak plate. Isolasi bakteri asam laktat dilakukan menggunakan media de Man Rogosa and Sharpe Agar (MRSA) yang ditambahkan CaCO_3 dan diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam. Koloni yang menunjukkan zona bening di sekitar koloni dipilih dan dimurnikan. Zona bening tersebut menunjukkan kemampuan bakteri dalam menghasilkan asam yang melarutkan CaCO_3 , sehingga digunakan sebagai indikator seleksi bakteri asam laktat (Pramono et al., 2015). Cawan petri tersebut diinkubasi selama 48 jam pada suhu 37°C. Setelah itu, bakteri yang tumbuh disimpan dalam lemari pendingin untuk pemeliharaan (Yulvizar *et al.*, 2023).

4.5.4 Perbanyakan Isolat Khamir dan Pemanenan Biomassa Khamir

Perbanyakan isolat khamir dilakukan setelah inkubasi isolat pada media YMEA selama 48 jam pada suhu ruang 28°C (Sari, 2020). Dua ose isolat diambil menggunakan jarum ose dan diinokulasikan ke dalam 15 ml media YMB (*Yeast Malt Broth*) di dalam elenmeyer untuk setiap isolat dengan satu kali ulangan. Kultur tersebut kemudian diinkubasi dalam inkubator shaker pada suhu 33°C dengan kecepatan 140 rpm selama 24 jam. Setelah 24 jam, 1 ml media YMB

ditambahkan ke dalam tabung eppendorf berukuran 15 ml yang berisi 9 ml media YPG. Media YPG yang mengandung inokulum khamir diinkubasi dalam inkubator shaker selama 48 jam dengan kecepatan 140 rpm. Setelah 48 jam, inokulum khamir pada media YPG disentrifugasi untuk memisahkan supernatan dan pellet (Zohri *et al.*, 2017). Pemanenan biomassa khamir dilakukan dengan cara sentrifugasi selama 4 menit pada kecepatan 4000 rpm untuk memisahkan supernatan dan endapan (pellet) dalam media YPG. Setelah proses sentrifugasi, supernatan dibuang, meninggalkan endapan yang kemudian diukur beratnya menggunakan timbangan digital (Karki *et al.*, 2017).

4.5.5 Penentuan Biomassa Khamir

Penentuan biomassa khamir dilakukan dengan metode yang mengacu pada Kusmiyati *et al.* (2022) dengan beberapa modifikasi. Pertama, tabung Eppendorf ditimbang terlebih dahulu untuk memperoleh berat awalnya. Selanjutnya, sampel khamir yang berasal dari media perlakuan dipisahkan antara media dan pelet khamir dengan menggunakan sentrifugasi pada kecepatan 4.000 rpm selama 15 menit. Setelah proses sentrifugasi selesai, supernatan dibuang sehingga hanya pelet khamir yang tersisa (Karki *et al.*, 2017). Data berat awal dan berat akhir tabung Eppendorf kemudian dicatat dan digunakan untuk menghitung biomassa khamir. Penimbangan biomassa yang didapatkan dilakukan dengan rumus seperti berikut Hidayat *et al* (2018):

$$B = B2 - B1$$

Keterangan:

B = Biomassa yang didapatkan (g/ml)

B2 = Eppendorf yang berisi biomassa (g)

B1 = Eppendorf kosong (g)

4.5.6 Pembuatan Starter Bakteri Asam Laktat

Starter dibuat dengan cara memasukkan satu ose bakteri asam laktat ke dalam tabung reaksi yang berisi 1 ml media MRSB steril, lalu inkubasi dilakukan pada suhu 37°C selama 24 jam. Inkubasi ini bertujuan untuk mengaktifkan kultur bakteri, yang ditandai dengan peningkatan kekeruhan pada media sebagai indikasi pertumbuhan bakteri. Setelah inkubasi selama 24 jam, sebanyak 1 ml inoculum dipindahkan dari tabung reaksi pertama ke tabung reaksi lain yang berisi 10 ml media MRSB steril. Tabung kedua kemudian diinkubasi kembali pada suhu 37°C selama 24 jam. Kultur bakteri asam laktat yang dihasilkan setelah proses ini siap digunakan sebagai starter (Kurniadi *et al.*, 2013). Starter dibuat dengan menginokulasikan satu ose bakteri asam laktat ke dalam tabung reaksi yang berisi 5 mL media MRS broth steril, kemudian diinkubasi pada suhu 37°C selama 48 jam. Pertumbuhan bakteri ditandai dengan terbentuknya kekeruhan pada media. Kultur yang telah aktif selanjutnya digunakan untuk tahap penelitian berikutnya (Nursini *et al.*, 2015).

4.5.7 Pembuatan Adonan Roti Gandum Hitam Kombinasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir

Proses pembuatan roti menggunakan agen pengembang adonan terdiri dari biomassa khamir (pellet) dan starter bakteri asam laktat yang telah diperoleh sebelumnya. Takaran bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan adonan mengikuti modifikasi dari metode Watanabe *et al.* (2016). Langkah pertama adalah menimbang bahan meliputi 100 g tepung gandum hitam, 1,5 g garam, 7,5 g gula, 8 g mentega, dan 35 ml air. Ditambahkan juga pellet khamir sebanyak 1,5% (1,5 g), 2% (2 g), dan 2,5% (2,5 g), serta starter bakteri asam laktat (BAL) dengan

takaran 2% (2 ml), 3% (3 ml), dan 4% (4 ml), bersama dengan 35 ml air. Selain itu, pengujian ini juga menggunakan kontrol negatif, di mana adonan roti tidak ditambahkan pellet khamir maupun starter bakteri asam laktat. Semua bahan dicampurkan, diuleni hingga adonan kalis dan dilakukan fermentasi selama 480 menit. Selanjutnya dipanggang selama 30 menit pada suhu 180 °C (Demirkesen et al., 2017).

4.5.8 Pengukuran pH Adonan Roti Gandum Hitam Kombinasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir

Pengukuran pH sebelum dan sesudah fermentasi dilakukan dengan cara menghomogenisasi sampel adonan dalam aquades, mengacu pada prinsip homogenisasi sampel, meskipun dengan modifikasi pada metode pengenceran. Selanjutnya homogenisasi 10 gram sampel roti sourdough dalam 90 ml aquades untuk keperluan analisis keasaman (Pontonio *et al.*, 2025) sedangkan pada penelitian ini 5 gram sampel roti gandum hitam dalam 45 ml aquades, sehingga pendekatan serupa dinilai relevan dalam pengukuran pH adonan roti gandum hitam.

4.5.9 Uji Kualitas Roti Gandum Hitam

Uji kualitas roti menggunakan pengujian organoleptik yang melibatkan penilaian menggunakan indera manusia. Kualitas roti diuji organoleptik berdasarkan warna, aroma, tekstur, dan rasa. Jenis uji organoleptik yang digunakan adalah uji kesukaan atau hedonik. Pengujian ini melibatkan 20 panelis, menggunakan 20 panelis dilibatkan untuk mengevaluasi roti yang dihasilkan (Zhang *et al.*, 2023). Setiap panelis diberi sampel roti dan diminta untuk menilai dengan menggunakan skala penilaian 1 sampai 5. Penilaian panelis dituliskan

dalam bentuk skala hedonik 1-5 (1= sangat tidak suka, 2= tidak suka, 3= biasa/netral, 4= suka, 5= sangat suka) (Choiriyah & Dewi, 2020).

4.6 Pengukuran Indeks Glikemik Secara *In Vitro* Roti Gandum Hitam

4.6.1 Persiapan Sampel

Sampel roti gandum hitam dihaluskan menggunakan mortal dan alu hingga halus. Proses penghalusan ini bertujuan untuk mensimulasikan proses mastikasi serta menghasilkan ukuran partikel yang lebih kecil sehingga meningkatkan luas permukaan dan mempermudah akses enzim terhadap pati selama hidrolisis secara *in vitro* (Sun *et al.*, 2022). Sebanyak 50 mg serbuk sampel kemudian ditimbang dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi. Tahap persiapan sampel ini bertujuan untuk memperoleh sampel yang homogen sehingga proses hidrolisis pati secara *in vitro* dapat berlangsung secara optimal dan konsisten (Rinadi, 2019).

4.6.2 Hidrolisis Pati Secara *In Vitro*

Hidrolisis pati secara *in vitro* dilakukan dengan mensimulasikan proses pencernaan pada saluran cerna manusia berdasarkan metode yang dimodifikasi dari Argyri *et al.* (2016) dan Goñi *et al.* (1997). Simulasi pencernaan dilakukan melalui tiga tahap, yaitu pencernaan lambung, pencernaan usus halus, dan tahap lanjutan hidrolisis enzimatik. Pada tahap pencernaan lambung, sampel ditambahkan 10 mL buffer HCl pH 1,5 dan 0,2 mL enzim pepsin. Campuran kemudian diinkubasi dalam waterbath pada suhu 37°C selama 30 menit dengan pengadukan perlahan untuk mensimulasikan kondisi fisiologis lambung. Selanjutnya, pH campuran dinaikkan hingga 6,9–7,0 menggunakan NaOH 0,1 N untuk mensimulasikan kondisi usus halus. Setelah itu, ditambahkan enzim α -amilase sebagai enzim pencernaan karbohidrat, kemudian campuran diinkubasi

pada suhu 37°C selama 2 jam. Selama tahap inkubasi dengan α -amilase, dilakukan pengambilan sampel (aliquot) pada menit ke-0, 30, 60, 90, dan 120. Pengambilan menit ke-0 dilakukan segera setelah penambahan enzim dan homogenisasi campuran (*time-zero sampling*), kemudian diikuti pengambilan pada interval waktu berikutnya sesuai perlakuan inkubasi. Setelah inkubasi selesai, reaksi dihentikan dengan pemanasan pada suhu 100°C selama 10 menit untuk mendenaturasi enzim. Selanjutnya, ditambahkan 3 mL buffer sodium asetat pH 4,7 dan 60 μ L enzim glukamilase, kemudian campuran diinkubasi kembali pada suhu 60°C selama 45 menit. Setelah inkubasi dengan enzim glukamilase selesai, reaksi dihentikan dengan pemanasan pada suhu 100°C selama 5 menit untuk menginaktivasi enzim. Selanjutnya hasil hidrolisis pati dibuat untuk penentuan kadar glukosa.

4.6.3 Pembuatan Kurva Standar Glukosa

Kurva standar glukosa dibuat sebagai acuan dalam mengkonversi nilai absorbansi hasil hidrolisis pati menjadi konsentrasi glukosa (mg/L). Larutan standar glukosa dibuat dengan variasi konsentrasi 20, 40, 60, 80, dan 100 mg/L menggunakan glukosa anhidrat yang dilarutkan dalam akuades. Sebanyak 1 mL setiap larutan standar dicampurkan dengan 1 mL reagen DNS dalam tabung reaksi 15 mL, kemudian dipanaskan pada suhu 100°C selama 10 menit hingga terbentuk warna merah-jingga yang khas. Setelah didinginkan pada suhu ruang, larutan diencerkan dengan akuades hingga volume 10 mL. Absorbansi masing-masing larutan standar diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 575 nm. Hasil pengukuran absorbansi pada berbagai konsentrasi glukosa digunakan untuk membuat persamaan regresi linear yang

menghubungkan konsentrasi (mg/L) sebagai sumbu x dan absorbansi sebagai sumbu y. Persamaan regresi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk mengkonversi nilai absorbansi sampel menjadi konsentrasi glukosa dalam satuan mg/L (Rinaldi, 2019).

4.6.4 Penentuan Kadar Glukosa

Pengukuran kadar glukosa sampel dilakukan terhadap setiap *aliquot* hasil inkubasi hidrolisis pati pada menit ke-0, 30, 60, 90, dan 120. Setiap *aliquot* dicampurkan dengan 1 mL reagen DNS dalam tabung reaksi 15 mL, dipanaskan pada suhu 100°C selama 10 menit hingga terbentuk warna kemerahan, didinginkan, lalu diencerkan dengan akuades hingga volume 10 mL. Absorbansi larutan diukur pada panjang gelombang 575 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis, kemudian nilai absorbansi yang diperoleh dikonversi menjadi kadar glukosa (mg/L) menggunakan persamaan regresi linear dari kurva standar. Hasil kadar glukosa selanjutnya dikonversi menjadi nilai pati terhidrolisis dengan mengalikan hasilnya dengan faktor 0,9, yaitu rasio berat molekul unit glukosa dalam rantai pati terhadap berat molekul glukosa bebas (Rinaldi, 2019).

4.6.5 Perhitungan estimated Glycemic Index (eGI)

Data kadar glukosa yang diperoleh digunakan untuk menyusun kurva hidrolisis pati sebagai fungsi waktu. Luas area di bawah kurva (*Area Under Curve/AUC*) dihitung menggunakan metode trapezoid dengan rumus berikut :

$$AUC = \frac{(y_1 + y_2)}{2} \times (x_2 - x_1)$$

Keterangan :

AUC = *Area Under Curva* (luas area dibawah kurva)

y_1 = kadar glukosa pada waktu pengukuran pertama (mg/L)

y_2 = kadar glukosa pada waktu pengukuran berikutnya (mg/L)

x_1 = waktu pengukuran pertama (menit)

x_2 = waktu pengukuran berikutnya (menit)

$(x_2 - x_1)$ = selang waktu antar pengukuran (dalam penelitian ini = 30 menit)

Nilai AUC sampel (roti gandum hitam) kemudian dibandingkan dengan AUC standar (roti putih) untuk memperoleh nilai *Hydrolysis Index* (HI). Selanjutnya, nilai HI digunakan untuk menghitung *estimated Glycemic Index* (eGI) menggunakan persamaan empiris, sehingga diperoleh klasifikasi indeks glikemik roti gandum hitam sebagai rendah, sedang, atau tinggi. Nilai *Hydrolysis Index* (HI) dan *estimated Glycemic Index* (eGI) dihitung menggunakan rumus berikut :

$$HI (\%) = \frac{AUC \text{ sampel}}{AUC \text{ standar}} \times 100$$

Keterangan ;

HI = *Hydrolysis Index*

AUC sampel = Luas area dibawah kurva roti gandum hitam

AUC standar = Luas area dibawah kurva roti putih sebagai pangan acuan

Berdasarkan metode yang dikembangkan oleh Goñi *et al.*, (1997), untuk perhitungan nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) maka masukkan nilai HI menggunakan persamaan berikut :

$$eGI = 39,71 + 0,549 \times HI$$

Keterangan :

eGI = *estimated Glycemic Index* (perkiraan nilai indeks glikemik)

HI = *Hydrolysis Index* (indeks hidrolisis pati)

39,71 = nilai konstanta (*intercept*)

0,549 = koefisien regresi (*slope*)

4.7 Analisis Data

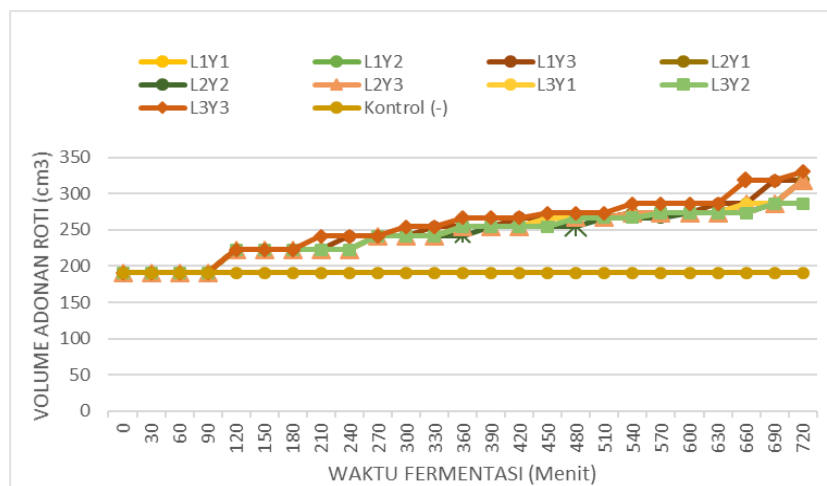
Data hasil penelitian meliputi nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) secara *in vitro*, serta karakteristik organoleptik roti gandum hitam. Data volume pengembangan adonan roti dianalisis menggunakan Microsoft Excel dengan penyajian dalam bentuk grafik untuk memvisualisasikan pola perubahan selama fermentasi. Data nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) yang meliputi nilai AUC, HI, dan eGI diuji normalitas menggunakan uji *Shapiro-Wilk*, kemudian diuji homogenitas varians menggunakan uji *Levene's*. Analisis data dilakukan dengan uji *One Way ANOVA* untuk melihat pengaruh perlakuan terhadap nilai eGI, dan jika terdapat perbedaan yang signifikan, uji Duncan (*Duncan's Multiple Range Test/ DMRT*) digunakan sebagai uji lanjut untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan. Data hasil uji organoleptik dianalisis menggunakan uji non-parametrik *Kruskal-Wallis*, dan jika ditemukan perbedaan signifikan, dilakukan uji *Mann-Whitney* dengan tingkat signifikansi 5% menggunakan SPSS untuk memastikan keakuratan hasil.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

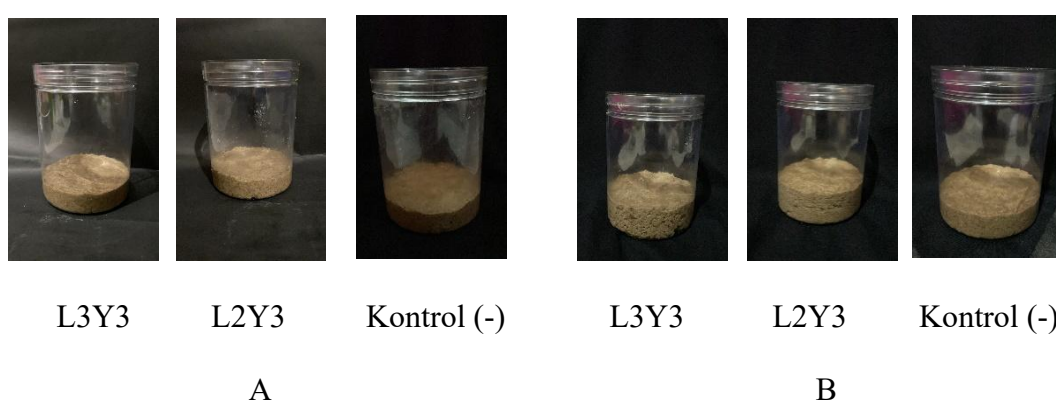
5.1 Volume Pengembangan Roti Gandum Hitam

Volume adonan roti merupakan indikator penting untuk mengevaluasi kualitas proses fermentasi, karena menunjukkan aktivitas metabolisme mikroorganisme yang digunakan. Pengukuran volume adonan bertujuan untuk menganalisis tingkat pengembangan adonan selama proses fermentasi (Lestari & Maharani, 2017). Proses pengembangan adonan roti terjadi akibat aktivitas kombinasi bakteri asam laktat (BAL) dan khamir yang mampu memecah pati menjadi gula, yang kemudian menghasilkan karbondioksida, etanol, dan asam laktat, zat-zat yang berperan dalam meningkatkan volume adonan roti (Katina, 2015). Pengamatan terhadap volume pengembangan adonan roti yang difermentasi dengan kombinasi BAL dan khamir dengan perbedaan variasi konsentrasi pada masing-masing perlakuan dilakukan setiap interval waktu 30 menit selama 12 jam. Data mengenai pengembangan volume adonan roti disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Pengaruh Kombinasi BAL dan khamir terhadap volume adonan roti gandum hitam

Gambar 4.1. menunjukkan bahwa pengembangan adonan roti mulai terlihat pada menit ke-120 dan volume awal seluruh adonan, baik pada kontrol negatif maupun semua perlakuan dengan variasi konsentrasi BAL dan khamir adalah 190,75 cm³ dan volume akhir 330,64. Menurut Arifin dkk (2023) menyatakan bahwa adonan roti yang ideal mampu mengembang hingga dua atau tiga kali lipat dari volume awal. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan BAL dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* selama fermentasi berperan dalam melepaskan gas serta membentuk pori-pori dalam adonan. Adonan roti gandum hitam pada kontrol negatif menunjukkan bahwa kombinasi BAL dan khamir berperan penting untuk memulai dan mempertahankan fermentasi, khususnya dalam memproduksi gas CO₂ dan mengubah struktur gluten agar mampu menahannya. Sebaliknya, karena tidak ada mikroorganisme fermentatif yang ditambahkan pada kontrol negatif, proses fermentasi tidak berlangsung, sehingga volume adonan tetap tidak berubah dari menit ke-30 hingga menit ke-720, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



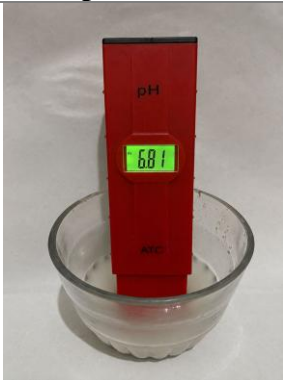
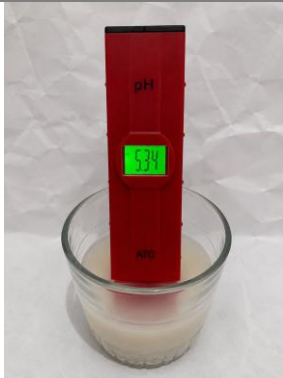
Gambar 4.2 Volume pengembangan adonan roti gandum hitam. (A) Perlakuan L2Y3, L3Y3, dan Kontrol pada menit ke-30, (B) L2Y3, L3Y3, dan Kontrol pada menit ke-720

Pengembangan volume adonan tertinggi ditunjukkan pada perlakuan L3Y3 dengan konsentrasi BAL sebanyak 4% dan khamir *Saccharomyces*

cerevisiae 2,5% dengan nilai volume sebesar 330,64, sedangkan perlakuan L2Y3 dengan konsentrasi BAL sebanyak 3% dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* 2,5% menunjukkan volume tertinggi kedua sebesar 317,92 cm³ yang terdapat pada Lampiran 4. Bakteri asam laktat pada konsentrasi 3% cukup untuk menurunkan pH dan mendukung aktivitas khamir, namun tidak menyebabkan degradasi gluten secara berlebihan. Hal ini menyebabkan gluten tetap mampu membentuk jaringan elastis untuk menahan gas CO₂ dan menghasilkan rongga udara yang stabil. Pada perlakuan L3Y3, roti gandum hitam menampilkan adanya rongga udara (pori-pori) yang terdapat pada Gambar di dalam adonan, yang menunjukkan bahwa khamir mampu melakukan fermentatif secara aktif dengan menghasilkan gas CO₂ melalui metabolisme gula, sehingga adonan mengembang dan membentuk tekstur berpori. Hal ini selaras dengan pernyataan Dziki *et al.*, (2022), aktivitas *Saccharomyces cerevisiae* dalam adonan roti gandum hitam menghasilkan CO₂ yang signifikan selama fermentasi membentuk struktur pori yang mempengaruhi volume spesifik dan tekstur remah roti. Konsentrasi khamir yang lebih tinggi berkorelasi positif dengan porositas adonan.

Berdasarkan hasil pengukuran volume roti dari grafik diatas, terdapat keterkaitan dengan penurunan nilai pH adonan roti gandum hitam pada tiap perlakuan. Pengukuran pH dalam penelitian ini dilakukan dengan cara menghomogenisasi sampel adonan dalam aquades, mengacu pada prinsip homogenisasi sampel yang digunakan oleh Pontonio *et al.*, (2025), meskipun dengan modifikasi pada metode pengenceran. Pontonio *et al.*, (2025) melakukan homogenisasi 10 gram sampel sourdough dalam 90 ml aquades untuk keperluan analisis keasaman, sedangkan penelitian ini 5 gram sampel roti gandum hitam

dalam 45 ml aquades, sehingga pendekatan serupa dinilai relevan dalam pengukuran pH adonan roti gandum hitam pada penelitian ini yang di tunjukkan pada Gambar 4.3.

Perlakuan	Sebelum Fermentasi	Sesudah Fermentasi
Kontrol	 pH = 7,14	 pH = 6,69
L1Y3	 pH = 6,81	 pH = 5,51
L3Y3	 pH = 6,90	 pH = 5,34

Gambar 4.3 Pengukuran pH adonan roti gandum hitam sebelum fermentasi dan sesudah fermentasi

Gambar 4.3 menunjukkan penurunan nilai pH dengan perlakuan kombinasi bakteri asam laktat dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* terjadi

setelah proses fermentasi berlangsung dibandingkan dengan nilai pH sebelum fermentasi. Proses fermentasi kombinasi BAL dan khamir pada adonan roti gandum hitam sejalan dengan pernyataan Pontonio *et al.*, (2025) bahwa eksositem fermentasi yang terdiri dari BAL dan khamir menghasilkan asam laktat dan asam asetat sebagai produk metabolisme utama yang berperan langsung dalam penurunan pH adonan roti. Sebelum dan sesudah fermentasi pada perlakuan kontrol terdapat nilai pH yang tinggi yaitu 7,14 dan 6,69 sedangkan terdapat nilai pH yang berbeda antara perlakuan L1Y3 dan L3Y3 dari sebelum dan sesudah fermentasi. Perlakuan L1Y3 menunjukkan nilai pH sebelum fermentasi yaitu 6,81 dan turun menjadi 5,51. Perlakuan L3Y3 menunjukkan nilai pH 6,90 sebelum fermentasi dan turun menjadi 5,34 setelah fermentasi. Perbedaan nilai pH antar konsentrasi perlakuan menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi BAL yang digunakan, nilai pH cenderung semakin rendah. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya sel BAL *Lactiplantibacillus plantarum* yang aktif memproduksi senyawa asam organik selama fermentasi. Sementara itu keberadaan khamir *Saccharomyces cerevisiae* berkontribusi pada pembentukan CO₂ dan etanol yang mempengaruhi kondisi lingkungan adonan roti (Demirkesen *et al.*, 2021).

5.2 Kualitas Organoleptik Roti Gandum Hitam Hasil Fermentasi Kombinasi

BAL *Lactiplantibacillus plantarum* dan Khamir *Saccharomyces cerevisiae*

Pengujian organoleptik pada produk pangan bertujuan untuk mendukung pengembangan produk baru serta meningkatkan efisiensi dalam proses produksi (Choiriyah & Dewi, 2020). Pengujian ini melibatkan panelis sebagai penilai, sehingga hasil yang diperoleh mencerminkan persepsi manusia bersifat sensitif

dan subjektif. Dalam industri roti, analisis sensorik memiliki peran penting dalam mengevaluasi mutu serta tingkat penerimaan produk roti berdasarkan sudut pandang konsumen (Guine, 2022). Kualitas organoleptik pada roti sangat dipengaruhi oleh proses fermentasi yang berlangsung selama pembuatannya (Nawika dkk., 2017).

Data sifat organoleptik yang diperoleh melalui uji hedonik yang dianalisis menggunakan uji *Kruskal-Wallis* dengan hasil yang dilampirkan dalam Lampiran 11. Hasil ini menunjukkan nilai yang signifikan menunjukkan bahwa variasi konsentrasi bakteri asam laktat (BAL) dan khamir *Saccaromyces cerevisiae* memberikan pengaruh nyata terhadap karakteristik organoleptik roti. Menurut Majid dkk. (2017) menyatakan bahwa apabila uji *Kruskal-Wallis* menunjukkan perbedaan yang signifikan, maka perlu dilakukan uji *Mann Whitney*. Uji *Mann Whitney* dilakukan untuk membandingkan setiap perlakuan secara berpasangan untuk menganalisis perbedaan pengaruhnya terhadap sifat organoleptik roti, sebagaimana disajikan dalam Lampiran 12.

5.2.1 Rasa

Rasa merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi tingkat kesukaan panelis terhadap suatu produk. Rasa pada roti dipengaruhi oleh komposisi bahan serta fermentasi adonan. Fermentasi juga mempengaruhi pembentukan senyawa seperti ester, asam dan alkohol yang berkontribusi pada cita rasa khas roti (Saepudin dkk., 2017). Hal ini menunjukkan bahwa setiap perlakuan memberikan pengaruh nyata terhadap penilaian rasa oleh panelis. Nilai organoleptik untuk parameter rasa berkisar antara 2,2 - 4,6 yang disajikan pada Lampiran 10, yang berarti tanggapan panelis bervariasi dari netral atau biasa hingga menyukai.

Perlakuan L3Y3, yang merupakan kombinasi BAL 4% dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* 2,5%, menunjukkan hasil pengembangan adonan yang tinggi sekaligus memperoleh nilai tertinggi dalam uji hedonik rasa sebesar 4,6.

Hal ini menunjukkan bahwa pada perlakuan L3Y3, dalam peningkatan konsentrasi BAL menjadi 4% menyebabkan akumulasi asam organik yang lebih tinggi, sehingga menghasilkan rasa yang lebih tajam dan cenderung terlalu asam bagi sebagian panelis, meskipun perlakuan ini memberikan hasil yang baik pada parameter volume, warna, aroma dan tekstur pada roti. Konsentrasi khamir sebesar 2,5% tergolong relatif tinggi karena mampu meningkatkan aktivitas fermentasi, sehingga produksi gas karbondioksida menjadi lebih optimal. Hal ini mempengaruhi pengembangan adonan yang lebih baik serta memperkuat pembentukan cita rasa khas pada roti.

Menurut Akamine *et al.*, (2023), khamir berperan dalam menghasilkan gas selama proses fermentasi yang menyebabkan adonan mengembang. Selain itu, interaksi antara khamir dan BAL menghasilkan senyawa organik volatil yang turut membentuk karakter rasa roti. Cita rasa khas roti juga dipengaruhi oleh aktivitas enzimatik BAL, seperti perubahan glutamin menjadi glutamat serta arginin menjadi ornitin selama proses pemanggangan. Berbagai reaksi mikroba dan enzimatik lainnya, termasuk oksidasi lipid oleh enzim yang berasal dari sereal, juga berperan dalam meningkatkan mutu rasa dan tekstur roti.

5.2.2 Aroma

Aroma merupakan satu di antara aspek penting dalam menilai mutu suatu produk pangan. Aroma salah satu bagian dari senyawa kimia yang beragam seperti alkohol, aldehida, ester, dan fenol. Secara jumlah, keberadaan senyawa

aroma berkontribusi dalam menentukan karakteristik keseluruhan suatu produk pangan (Žuljević & Spaho, 2024). Kehadiran aroma memiliki daya tarik yang signifikan mampu merangsang indera penciuman dan meningkatkan keinginan untuk makan. Aroma tersebut dihasilkan dari pembentukan senyawa volatil (Lilirdkk., 2021). Hasil uji lanjut *Mann Whitney* terhadap parameter aroma pada Lampiran 12 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan antara semua perlakuan dibandingkan dengan kontrol negatif. Hal ini menunjukkan bahwa setiap perlakuan memberikan pengaruh nyata terhadap penilaian aroma oleh panelis. Nilai organoleptik aroma berkisar antara 2,4 – 4,4 menunjukkan bahwa respons panelis bervariasi dari tidak menyukai hingga menyukai.

Penambahan BAL dalam pembuatan roti dapat meningkatkan senyawa aroma, seperti asam aromatik. Strain homofermentatif umumnya menghasilkan diacetyl, acetaldehyde, dan hexanal, sedangkan strain heterofermentatif menghasilkan ethyl acetate, alkohol, dan aldehida (Katina, 2015). Roti dengan penambahan kombinasi BAL dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* dapat menghasilkan aroma khas karena terjadi interaksi metabolik yang kompleks, menghasilkan asam organik selama fermentasi. Kandungan asam organik memainkan peran penting dalam pembentukan aroma pada roti (Luca *et al.*, 2021).

Saccharomyces cerevisiae berperan penting di tahap awal fermentasi melalui enzim invertase yang mengubah sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa. Gula sederhana ini kemudian difermentasi menjadi karbon dioksida dan alkohol (Ridhani & Aini, 2021). Bakteri asam laktat (BAL) dan khamir dalam adonan roti menghasilkan prekursor aroma seperti asam amino bebas, yang kemudian diubah

menjadi senyawa aroma seperti aldehida dan alkohol melalui jalur metabolic (Akamine, 2022). Senyawa 3-Metil-1-butanol merupakan satu di antara senyawa aroma volatil yang penting dalam remah roti yang berasal dari degradasi asam amino dan berkontribusi kuat terhadap aroma remah roti (Lau *et al.*, 2021).

5.2.3 Warna

Warna merupakan satu di antara faktor penting dalam menilai kualitas roti. Produk makanan, meskipun memiliki tekstur yang baik, cita rasa yang enak dan kandungan gizi yang tinggi, warna yang kurang menarik dapat membuat produk tersebut dianggap tidak layak dikonsumsi (Faizah & Ilyas, 2022). Warna berfungsi sebagai indikator untuk menentukan tingkat kematangan dan kesegaran produk pangan. Penilaian mutu bahan pangan seringkali digunakan berbagai indikator, namun warna seringkali menjadi acuan utama sebelum mempertimbangkan aspek lainnya. Tampilan warna permukaan roti setelah pemanggangan dapat dilihat pada Gambar 4.4



Gambar 4. 4 Warna roti gandum hitam. (A) Perlakuan L1Y3, (B) Perlakuan L3Y3, (C) Perlakuan kontrol negatif

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa perlakuan kontrol negatif, warna roti cenderung lebih pucat sehingga kurang sesuai dengan karakteristik roti gandum hitam yang diharapkan. Warna yang kurang intens menunjukkan bahwa pembentukan gula pereduksi selama fermentasi tidak berlangsung optimal dan

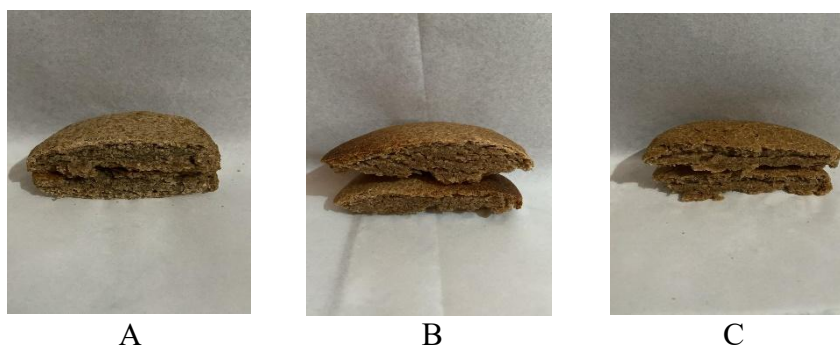
terjadi pada tiap perlakuan berbeda-beda. Sebaliknya, Terdapat rentang skor pada aspek warna berada di antara 2,6 – 4,6 yang terdapat pada Lampiran 10. yang menunjukkan bahwa respons panelis bervariasi dari tidak menyukai hingga menyukai. Perlakuan L3Y3, yaitu kombinasi bakteri asam laktat (BAL) 4% dan khamir 2,5% memperoleh skor tertinggi sebesar 4,6 dan diikuti oleh perlakuan L1Y3 yaitu kombinasi BAL 2% dan khamir 2,5% dengan nilai 4,3 yang mengindikasikan bahwa mayoritas panelis menyukai warna roti pada perlakuan L1Y3 dan L3Y3. Hal ini menjadikan warna yang menarik pada roti gandum hitam hasil fermentasi dengan memperoleh tingkat kesukaan yang tinggi dari panelis. Sedangkan pada perlakuan kontrol negatif, dengan tidak adanya mikroorganisme fermentatif, proses pembentukan gula pereduksi dan reaksi pencoklatan tidak terjadi secara optimal, sehingga roti kurang menarik. Hal ini menyebabkan roti pada perlakuan kontrol negatif memperoleh tingkat kesukaan yang rendah dari panelis.

Bakteri asam laktat (BAL) menghasilkan enzim seperti amilase dan pululanase yang mengubah amilosa dan amilopektin menjadi glukosa dan maltosa, yang merupakan gula pereduksi yang juga berperan dalam pembentukan warna melalui proses termal (Vatanasuchart *et al.*, 2012). Khamir juga mempengaruhi warna roti melalui produksi metabolit sekunder yang terlibat dalam reaksi non-enzimatik seperti karamelisasi dan Maillard, yang menghasilkan pigmen coklat selama pemanggangannya (Srivastava *et al.*, 2022). Reaksi *Maillard* merupakan satu di antara proses kimia utama dalam pembuatan roti gandum hitam, yang berkontribusi terhadap warna, rasa dan nilai nutrisi produk. Proses *Maillard* dimulai dari reaksi antara gugus amino bebas, seperti asam amino,

peptida, atau protein dengan gugus karbonil dari gula pereduksi, menghasilkan senyawa N-glikosida. Reaksi ini berlanjut dengan pembentukan senyawa antara yang reaktif, yang dapat berikatan silang dengan protei lain, dan akhirnya menghasilkan pigmen coklat tua yang disebut melanoidin (Deleu *et al.*, 2020).

5.2.4 Tekstur

Tekstur merupakan sifat fisik yang dirasakan oleh indra peraba dan berperan penting dalam memengaruhi preferensi konsumen terhadap produk makanan. Roti dengan tekstur ideal memiliki permukaan halus, mudah dikunyah, elastis saat ditekan, dan tidak lengket (Kusnandar dkk., 2022). Hasil uji lanjut *Mann Whitney* terhadap parameter tekstur pada Lampiran 12 yang menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara semua perlakuan dibandingkan dengan kontrol negatif. Hal ini mengindikasikan bahwa setiap perlakuan memberikan nyata terhadap penilaian tekstur oleh panelis. Nilai organoleptik tekstur berkisar antara 2,4 - 4,5, menunjukkan bahwa tanggapan panelis bervariasi dari tidak menyukai hingga menyukai. Perlakuan L3Y3, yaitu kombinasi bakteri asam laktat (BAL) 4% dan khamir endofit 2,5%, memperoleh nilai rata-rata 4,5, yang berarti mayoritas panelis menyukai tekstur roti pada perlakuan L3Y3. Perlakuan L3Y3 menghasilkan roti dengan tekstur lembut dengan struktur pori yang optimal, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Tekstur roti gandum hitam. (A) Perlakuan L1Y3, (B) Perlakuan L3Y3, (C) Perlakuan kontrol negatif

Gambar 4.5 menunjukkan terdapat perbedaan antar perlakuan yang dilihat dari tekstur roti gandum hitam. Perlakuan L1Y3 menunjukkan bahwa terdapat nilai rata-rata 4,4 yaitu nilai tertinggi kedua setelah L3Y3 yang berarti tingkat kesukaan yang tinggi oleh panelis. Hal ini dikarenakan perlakuan L1Y3 dengan kombinasi BAL 2% dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* 2,5% menghasilkan tekstur roti yang lebih disukai panelis dibandingkan perlakuan lainnya. Konsentrasi khamir 2,5% pada perlakuan ini berperan optimal dalam memproduksi gas CO₂ selama fermentasi sehingga adonan mengembang dengan baik dan menghasilkan struktur remah (*crumb*) yang lebih ringan, seragam, dan elastis. Hal ini sesuai dengan pernyataan Wang *et al.*, (2024), bahwa konsentrasi khamir yang terlalu tinggi justru menyebabkan ekspansi gas CO₂ melebihi kekuatan jaringan gluten sehingga merusak struktur internal adonan dan berdampak negatif pada elastisitas roti. dan perlakuan kontrol menunjukkan nilai hedonik terendah dengan skor 2,4 (agak tidak suka). Perlakuan kontrol tidak terjadi proses pengembangan adonan, sehingga tidak terbentuk pori-pori dan tekstur roti menjadi keras. Didar & Khodaparast (2010) menyatakan bahwa kultur starter yang mengandung campuran BAL dan khamir dapat memberikan hasil yang positif terhadap pengembangan roti. Asam yang di hasilkan oleh BAL meningkatkan kemampuan matriks adonan dalam menahan gas, sehingga terjadi pelarutan dan degradasi makropolimer gluten. Akibatnya, adonan roti menjadi lebih lembut, elastis, dan memiliki volume pengembangan yang lebih optimal.

Khamir *Saccharomyces cerevisiae* dengan konsentrasi 2,5% pada perlakuan L3Y3 berkontribusi melalui pengembangan adonan yang lebih optimal.

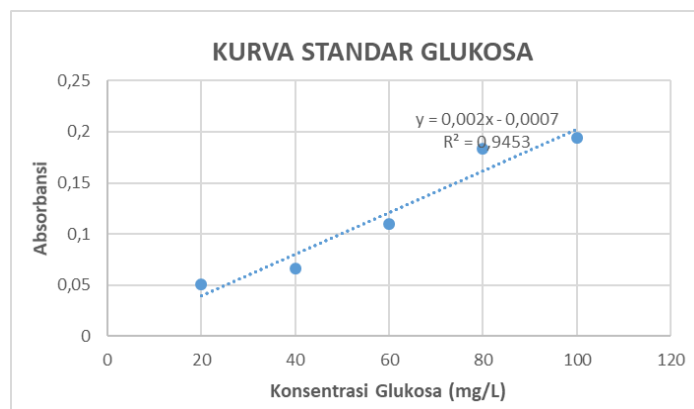
Ko-kultur BAL dan khamir yang optimal dalam fermentasi menghasilkan spesifik volume tertinggi dan remah paling lembut (*softest crumb*) dibandingkan perlakuan lainnya, dengan temuan Hernandez *et al.*, (2025) yang menyatakan bahwa *Lactiplantibacillus plantarum* dan spesies *Leuconostoc* secara nyata meningkatkan porositas roti dan kualitas struktur secara keseluruhan. Pola ini sejalan dengan hasil pada perlakuan L3Y3, di mana sinergi antara BAL 4% dan khamir 2,5% menghasilkan fermentasi yang paling produktif dalam memperbaiki tekstur.

5.3 Pengukuran Nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) Roti Gandum Hitam Secara In Vitro Kombinasi BAL *Lactiplantibacillus plantarum* dan Khamir *Saccharomyces cerevisiae*

5.3.1 Kurva Standar Glukosa

Kurva standar glukosa dibuat sebagai dasar perhitungan kadar glukosa hasil hidrolisis pati pada seluruh sampel roti gandum hitam. Kurva standar merupakan hubungan linier antara konsentrasi larutan glukosa yang telah diketahui dengan nilai absorbansi yang terukur menggunakan spektrofotometri. Kurva standar yang valid merupakan syarat penting dalam analisis kuantitatif glukosa secara spektrofotometri agar hasil pengukuran sampel dapat dipercaya (Argyri *et al*, 2016).

Hasil pengukuran absorbansi larutan standar glukosa pada berbagai konsentrasi (20, 40, 60, 80, dan 100 mg/L) menghasilkan persamaan regresi linear $y = 0,002x - 0,0007$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,9453$ yang terdapat pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Kurva Standar Glukosa Roti Gandum Hitam

Persamaan tersebut digunakan untuk mengkonversi nilai absorbansi sampel menjadi kadar glukosa (mg/L). Menurut Pratama (2022), nilai R^2 yang mendekati 1 mengindikasikan bahwa terdapat hubungan linier yang kuat antara konsentrasi dan absorbansi, sehingga persamaan regresi tersebut layak digunakan untuk menentukan konsentrasi glukosa sampel yang tidak diketahui.

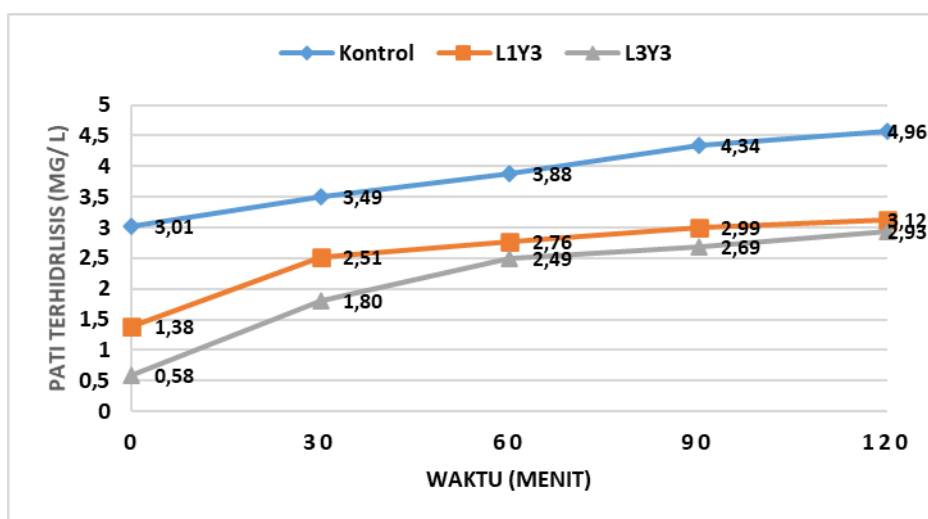
Nilai $R^2 = 0,9453$ yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa sekitar 94,53% variasi absorbansi dapat dijelaskan oleh variasi konsentrasi glukosa. Meskipun nilai ini sedikit dibawah standar ideal ($R^2 \geq 0,99$) yang umumnya digunakan dalam validasi metode analitik, namun masih menunjukkan korelasi positif yang cukup kuat dan dapat digunakan sebagai acuan perhitungan dalam penelitian ini. Oleh karena itu, interpretasi hasil kadar glukosa tetap mengacu pada persamaan ini dengan mempertimbangkan batas keterandalannya.

5.3.2 Kadar Glukosa Hasil Hidrolisis Pati

Penentuan nilai eGI secara *in vitro* diawali dengan pengukuran kadar glukosa hasil hidrolisis pati pada setiap interval waktu (0, 30, 60, 90, dan 120 menit) menggunakan enzim amilase, pepsin, dan glucoamylase. Metode ini mensimulasikan proses pencernaan pati didalam tubuh secara *in vitro*, dimana semakin tinggi kadar glukosa yang dilepaskan seiring waktu, maka semakin tinggi

pula potensi indeks glikemiknya (Argyri *et al.*, 2016). Data perlakuan disajikan hidrolisis pati tiap interval waktu pada Tabel 4.1. Dalam konteks simulasi pencernaan enzim α -amilase mempresentasikan aktivitas enzim pada saliva dan pankreas yang memulai proses pemecahan pati segera setelah makanan masuk kedalam mulut dan usus halus. Enzim pepsin berperan dalam mensimulasikan kondisi lambung yang bersifat asam dan kehadirannya dalam metode *in vitro* yaitu penting untuk membantu pemecahan matriks protein yang melapisi granula pati, sehingga pati menjadi mudah di akses oleh enzim berikutnya dan enzim glukoamilase juga membantu memecah rantai amilopektin sehingga seluruh struktur pati terhidrolisis menjadi glukosa bebas (Nursyahidah *et al.*, 2018).

Hasil pengukuran hidrolisis pati pada semua perlakuan, kadar glukosa meningkat seiring dengan bertambahnya waktu hidrolisis dari menit ke-0 hingga menit ke-120 yang disajikan juga pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Hidrolisis Pati Tiap Perlakuan

Gambar 4.7 menunjukkan pati terhidrolisis (mg/L) pada seluruh perlakuan roti gandum hitam selama 120 menit inkubasi. Angka - angka yang terdapat dalam grafik tersebut diperoleh melalui tahapan analisis spektrofotometri

menggunakan metode *3,5-dinitrosalisilat* (DNS). Rata-rata nilai kadar hidrolisis pati disajikan pada Lampiran 14. Nilai absorbansi dari setiap *aliquot* yang diambil pada menit ke-0, 30, 60, 90, dan 120 diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 575 nm, kemudian dikonversi menjadi kadar glukosa (mg/L) menggunakan persamaan regresi linear kurva standar glukosa $y = 0,002x - 0,0007$. Nilai kadar glukosa tersebut selanjutnya dikalikan dengan faktor konversi 0,9 yang merupakan rasio berat molekul unit glukosa dalam rantai pati terhadap berat molekul glukosa bebas, sehingga diperoleh nilai pati terhidrolisis (mg/L) yang terdapat pada Gambar 4.7 (Rinaldi, 2019).

Peningkatan pati terhidrolisis yang konsisten dari menit ke-0 hingga menit ke-120 pada seluruh perlakuan merupakan fenomena yang dapat dijelaskan melalui mekanisme kerja enzim amilolitik yang bersifat akumulatif. Enzim α -amilase dan glukoamilase yang ditambahkan dalam sistem hidrolisis *in vitro* bekerja secara kontinyu memutus ikatan glikosidik α -1,4 dan α -1,6 pada rantai amilosa dan amilopektin pati, menghasilkan dekstrin, maltosa, dan akhirnya glukosa bebas yang terakumulasi seiring berjalannya waktu inkubasi. Kadar glukosa yang terukur pada setiap titik waktu merupakan akumulasi total produk hidrolisis yang terbentuk sejak awal reaksi, sehingga nilainya secara alami terus meningkat dan tidak dapat menurun selama enzim masih aktif (Argyri *et al.*, 2016). Hal ini menjelaskan mengapa kurva hidrolisis pati pada semua perlakuan menunjukkan kenaikan dari menit ke-0 hingga menit ke-120.

Perbedaan laju kenaikan antar perlakuan menunjukkan efektivitas fermentasi kombinasi BAL dan khamir dalam menghambat aktivitas enzim amilolitik. Perlakuan kontrol (tanpa BAL dan khamir) menunjukkan laju

peningkatan pati terhidrolisis yang paling cepat karena tidak terdapat asam organik maupun metabolit fermentasi yang dapat menghambat enzim α -amilase. Sebaliknya, perlakuan L3Y3 (BAL *Lactiplantibacillus palntarum* 4% dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* 2,5%) menunjukkan laju kenaikan paling lambat, yang mengindikasikan bahwa produksi asam laktat dan asam asetat dalam jumlah lebih besar secara efektif menekan aktivitas enzim amilolitik serta mendorong pembentukan pati resisten tipe 3 (RS3) melalui retrogradasi amilosa (Demirkesen *et al.*, 2021).

Berdasarkan grafik hidrolisis pati yang diatas, terdapat bahwa nilai absorbansi pada menit ke-0 antar perlakuan tidak berada pada titik yang sama. Kondisi ini menunjukkan bahwa setiap sampel roti gandum hitam memiliki nilai awal yang berbeda meskipun pengukuran dilakukan pada waktu yang sama. Menurut Woolnough *et al.*, (2010) bahwa perbedaan pada menit ke-0 karena terdapat reaksi hidrolisis enzimatik sudah mulai berlangsung sejak proses pencampuran sampel dan substrat. Dengan demikian, menit ke-0 dalam pengamatan spektrofotometri tidak merepresentasikan kondisi “reaksi belum terjadi”, melainkan sebagai titik awal pengukuran setelah reaksi mulai berjalan secara spontan. Selain itu, perbedaan nilai awal antar perlakuan juga dipengaruhi oleh karakteristik masing-masing sampel, seperti perbedaan komposisi BAL dan khamir, aktivitas enzimatik, serta matriks bahan yang berbeda (Butterworth *et al.*, 2022).

5.3.3 Nilai AUC (Area Under Curva)

Nilai AUC (*Area Under Curva*) merupakan luas daerah di bawah kurva hidrolisis glukosa yang menggambarkan total glukosa yang dilepaskan selama

120 menit hidrolisis. Semakin kecil nilai AUC suatu sampel, semakin lambat laju pelepasan glukosa, yang mengindikasikan potensi indeks glikemik yang lebih rendah (Argyri *et al.*, 2016). Rata-rata nilai AUC setiap perlakuan disajikan pada Tabel 4.1 berikut :

Tabel 4.1 Pengaruh Kombinasi BAL dan Khamir terhadap Rata-rata Nilai AUC Roti Gandum Hitam

Perlakuan	Dosis BAL	Dosis Khamir	Rata-rata AUC (mg/L·menit)
Kontrol	0,0%	0,0%	109,13 ^a
L1Y3	2,0%	2,5%	75,80 ^b
L3Y3	4,0%	2,5%	59,60 ^c

Keterangan:

Huruf berbeda (a, b, c) menunjukkan perbedaan nyata antar perlakuan berdasarkan uji Duncan (DMRT) taraf 95%. Data selengkapnya per ulangan disajikan pada Lampiran 17.

Berdasarkan Tabel 4.1 menunjukkan nilai AUC tertinggi diperoleh pada perlakuan kontrol sebesar 109,13 mg/L·menit, diikuti perlakuan L1Y3 sebesar 75,80 mg/L·menit, dan nilai AUC terendah pada perlakuan L3Y3 sebesar 59,60 mg/L·menit. Penurunan nilai AUC seiring meningkatnya konsentrasi BAL dan khamir menunjukkan bahwa kombinasi kedua mikroorganisme ini secara sinergis memperlambat laju pelepasan glukosa selama hidrolisis pati. Hal ini sejalan dengan temuan Scazzina *et al.*, (2009) bahwa roti yang difermentasi sourdough memberikan respons glikemik yang secara signifikan lebih rendah ($p < 0,001$) dibandingkan roti yang difermentasi hanya dengan *Saccharomyces cerevisiae*. Nilai AUC seluruh perlakuan lebih rendah dibandingkan AUC referensi roti putih sebesar 201,877 yang disajikan pada Lampiran 16 yang mengkonfirmasi bahwa

roti gandum hitam dengan fermentasi kombinasi BAL dan khamir memiliki profil pelepasan glukosa yang lebih lambat dibandingkan roti putih standar.

5.3.4 Nilai HI (*Hydrolysis Index*)

Nilai HI (*Hydrolysis Index*) dihitung berdasarkan rasio antara AUC sampel dengan AUC referensi (roti putih) dikalikan 100. HI mencerminkan seberapa cepat pati dalam sampel dihidrolisis dibandingkan dengan referensi. Semakin rendah nilai HI, semakin lambat pati terhidrolisis dan semakin rendah potensi indeks glikemiknya (Goñi *et al.*, 1997). Rata-rata nilai HI setiap perlakuan disajikan pada Tabel 4.2 berikut :

Tabel 4.2 Pengaruh Kombinasi BAL dan Khamir terhadap Rata-rata Nilai HI Roti Gandum Hitam

Perlakuan	Dosis BAL	Dosis Khamir	Rata-rata HI (%)
Kontrol	0,0%	0,0%	54,06 ^a
L1Y3	2,0%	2,5%	37,55 ^b
L3Y3	4,0%	2,5%	29,52 ^c

Keterangan:

Huruf berbeda (a, b, c) menunjukkan perbedaan nyata antar perlakuan berdasarkan uji Duncan (DMRT) taraf 95%. Data selengkapnya per ulangan disajikan pada Lampiran 17.

Berdasarkan Tabel 4.2, nilai HI tertinggi terdapat pada perlakuan kontrol sebesar 54,06%, diikuti L1Y3 sebesar 37,55%, dan nilai HI terendah pada perlakuan L3Y3 sebesar 29,52%. Penurunan nilai HI pada perlakuan L1Y3 dan L3Y3 dibandingkan kontrol menunjukkan bahwa kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccharomyces cerevisiae* secara sinergis menghambat laju hidrolisis pati. Mekanisme utama penurunan HI adalah peran asam organik, khususnya asam laktat yang berinteraksi dengan gluten sehingga membatasi ketersediaan pati untuk hidrolisis enzimatis, serta asam asetat yang memperlambat

pengosongan lambung (Nurhayati *et al.*, 2019). Nilai HI perlakuan L3Y3 yang paling rendah mengindikasikan bahwa konsentrasi BAL 4% bersama khamir 2,5% paling efektif dalam memperlambat proses pencernaan pati, yang berimplikasi langsung pada penurunan nilai eGI.

5.3.5 Nilai *estimated Glycemic Index* (eGI)

Nilai eGI dihitung menggunakan persamaan empiris, $eGI = 39,71 + 0,549 \times HI$ (Goni *et al.*, 1997). Menurut Arif *et al.*, (2014) Nilai indeks glikemik dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori yaitu rendah (<55), sedang ($55 - 69$), dan tinggi (≥ 70). Nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) pada penelitian ini merupakan rata-rata dari tiga ulangan pengukuran yang terdapat pada Lampiran 17. Nilai eGI dengan perlakuan kontrol berkisar antara 67,41 - 71,76 (kategori sedang hingga tinggi), dan perlakuan L1Y3 menghasilkan nilai eGI berkisar 58,78 - 61,43 (kategori sedang) sedangkan perlakuan L3Y3 menghasilkan nilai eGI terendah yaitu berkisar antara 55,43 - 56,58 (kategori rendah hingga sedang) yang disajikan dalam Lampiran 17. Hasil uji *One Way Anova* menunjukkan terdapat perbedaan nyata antar perlakuan terhadap nilai eGI ($p = < 0,05$) yang terdapat pada Lampiran 19. dan hasil uji lanjut Duncan terdapat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengaruh Kombinasi BAL dan Khamir terhadap Rata-rata Nilai eGI Roti Gandum Hitam

Perlakuan Roti Gandum Hitam	Dosis BAL	Dosis Khamir	Rata-rata Nilai eGI	Kategori eGI
Kontrol	0,0%	0,0%	69,33 ^a	Sedang
L1Y3	2,0%	2,5%	59,67 ^b	Sedang
L3Y3	4,0%	2,5%	55,33 ^c	Sedang (batas bawah)

Keterangan:

Huruf yang berbeda (a, b, c) pada kolom notasi menunjukkan perbedaan yang nyata antar perlakuan berdasarkan uji Duncan (DMRT) pada taraf 95%. Data perulangan selengkapnya disajikan pada Lampiran 17.

Berdasarkan tabel 4.3 menunjukkan nilai rata-rata eGI perlakuan kontrol sebesar 69,33 masuk kategori sedang karena kurang dari 70. Hal ini menunjukkan bahwa tidak adanya mekanisme penghambatan enzim pencernaan pati dari asam organik fermentasi menyebabkan pati terhidrolisis lebih cepat dan glukosa yang dilepaskan lebih banyak. Perlakuan L1Y3 menghasilkan nilai rata-rata eGI sebesar 59,67 yang juga termasuk kategori sedang namun lebih rendah dibandingkan kontrol, menunjukkan bahwa kombinasi BAL 2% dan khamir 2,5% sudah cukup efektif dalam menghambat hidrolisis pati. Penurunan nilai eGI terbesar terdapat pada perlakuan L3Y3 dengan kombinasi BAL 4% dan khamir 2,5% yang menghasilkan nilai rata-rata eGI terendah sebesar 55,33, berada di batas bawah kategori sedang dan sangat mendekati kategori rendah (<55). Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi BAL yang dikombinasikan dengan khamir, semakin besar produksi asam laktat dan asam asetat yang menghambat enzim α -amilase sekaligus membentuk kompleks pati-protein yang lebih sulit dihidrolisis. Selaras dengan pernyataan Demirkesen *et al.*, (2021), bahwa semakin tinggi konsentrasi BAL yang dikombinasikan dengan khamir, semakin besar produksi asam organik yang menghambat aktivitas enzim α -amilase sekaligus mendorong pembentukan kompleks pati yang lebih sulit dihidrolisis. Secara sinergis, fermentasi karbohidrat oleh *S. cerevisiae* menghasilkan etanol dan CO₂ yang turut berkontribusi dalam memperlambat hidrolisis pati sehingga nilai eGI roti gandum hitam menurun.

Demirkesen *et al.* (2021) menyatakan bahwa roti dengan fermentasi menggunakan kultur murni menghasilkan nilai eGI yang lebih rendah dibandingkan fermentasi spontan, karena fermentasi menggunakan *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccharomyces cerevisiae* secara nyata dapat meningkatkan kandungan *resistant starch* (RS) sekaligus menurunkan nilai HI dan eGI dibandingkan kontrol tanpa fermentasi. Meskipun nilai eGI perlakuan kontrol sebesar 69,33 merupakan nilai tertinggi di antara ketiga perlakuan, nilai tersebut tetap lebih rendah dibandingkan roti putih yang secara umum memiliki nilai indeks glikemik sebesar 70–75. Selaras dengan pernyataan Pasqualoni *et al.* (2024) bahwa roti putih diklasifikasikan sebagai pangan dengan indeks glikemik tinggi (>70) akibat rendahnya kandungan serat pangan, sedangkan gandum hitam memiliki kandungan serat pangan tertinggi di antara sereal lain (Iversen *et al.*, 2022).

Perbedaan kategori eGI antar perlakuan menunjukkan efektivitas yang berbeda dari masing-masing konsentrasi kombinasi BAL dan khamir. Perlakuan kontrol menghasilkan rata-rata eGI pada roti gandum hitam sebesar 69,33 yang masuk kategori sedang namun berada di batas atas mendekati kategori tinggi (≥ 70), akibat tidak adanya produksi asam organik yang dapat memperlambat hidrolisis pati. Perlakuan L1Y3 (BAL 2% + khamir 2,5%) menghasilkan eGI 59,67 yang juga kategori sedang namun berada di tengah rentang, menandakan BAL 2% sudah cukup menghambat aktivitas enzim α -amilase secara parsial. Adapun perlakuan L3Y3 (BAL 4% + khamir 2,5%) menghasilkan eGI terendah sebesar 55,33 yang berada di batas bawah kategori sedang dan sangat mendekati kategori rendah (<55), menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi BAL yang

dikombinasikan dengan khamir, semakin besar produksi asam laktat dan asam asetat yang menghambat enzim α -amilase sekaligus membentuk kompleks pati-protein yang lebih sulit dihidrolisis. Hal ini selaras dengan pernyataan Demirkesen *et al.* (2021) bahwa ko-kultur BAL dan khamir *S. cerevisiae* dengan konsentrasi lebih tinggi menghasilkan penurunan eGI yang lebih besar karena sinergisme keduanya mempercepat pembentukan pati resisten yang menghalangi akses enzim pencernaan terhadap granula pati.

Penurunan eGI pada penelitian ini merupakan hasil dari mekanisme ganda yang bekerja secara sinergis. Pertama, asam laktat dan asam asetat yang dihasilkan oleh *Lactiplantibacillus plantarum* berinteraksi dengan gluten sehingga membatasi ketersediaan pati, sementara asam asetat turut memperlambat pengosongan lambung. Kedua, kandungan *arabinoxylan*, β -glukan, dan pati resisten yang tinggi dalam tepung gandum hitam membentuk matriks serat yang secara fisik memperlambat hidrolisis pati dan penyerapan glukosa. Interaksi sinergis antara metabolit fermentasi dan komponen serat gandum hitam inilah yang menjelaskan mengapa perlakuan dengan konsentrasi BAL dan khamir lebih tinggi secara konsisten menghasilkan nilai eGI lebih rendah dibandingkan kontrol (Nurhayati *et al.*, 2019).

Konsumsi pangan dengan nilai indeks glikemik sedang dianjurkan karena membantu mencegah kenaikan kadar gula darah yang drastis serta menjaga kestabilan gula darah setelah makan, yang sangat penting bagi penderita diabetes maupun individu berisiko mengalami gangguan metabolisme glukosa (Muflihati, 2017). Dengan demikian, roti gandum hitam hasil fermentasi kombinasi BAL 4% dan khamir 2,5% (L3Y3) pada penelitian ini terbukti aman dan berpotensi

bermanfaat bagi masyarakat umum maupun penderita diabetes. Nilai eGI sebesar 55,33 pada perlakuan L3Y3 menunjukkan bahwa roti ini tidak akan menyebabkan lonjakan gula darah yang tajam (*spike*) setelah dikonsumsi, melainkan melepaskan glukosa secara bertahap dan terkendali, sehingga menjadikan roti gandum hitam layak dipertimbangkan sebagai alternatif pangan fungsional dalam pola makan sehat berbasis indeks glikemik rendah.

5.4 Tinjauan Hasil Penelitian dalam Perspektif Al-Qur'an

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi bakteri asam laktat (BAL) *Lactiplantibacillus plantarum* dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* terbukti mampu menurunkan nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) roti gandum hitam secara signifikan dibandingkan kontrol tanpa perlakuan fermentasi. Penurunan nilai eGI ini terjadi melalui mekanisme produksi asam organik oleh BAL yang menurunkan pH adonan, pembentukan pati resisten, serta aktivitas enzim invertase oleh *S. cerevisiae* yang mengubah sukrosa menjadi gula sederhana dan selanjutnya difermentasi menjadi CO₂ dan etanol, sehingga kadar gula yang tersedia untuk dicerna dalam produk akhir menjadi lebih rendah (Demirkesen *et al.*, 2021; Khazalina, 2020). Konsumsi pangan dengan nilai indeks glikemik sedang hingga rendah dianjurkan karena membantu mencegah kenaikan kadar gula darah terutama bagi penderita diabetes maupun individu yang berisiko mengalami gangguan metabolisme glukosa (Muflihati, 2017).

Pengembangan pangan fungsional berbasis fermentasi seperti roti gandum hitam ini sejalan dengan keyakinan dalam Islam bahwa Allah SWT telah menyediakan penyembuhan dan pencegahan penyakit melalui berbagai ciptaan-

Nya di alam, termasuk bahan pangan alami. Hal ini sebagaimana ditegaskan dalam sabda Rasulullah SAW:

مَا أَنْزَلَ اللَّهُ دَاءً إِلَّا أَنْزَلَ لَهُ شِفَاءً

"Tidaklah Allah menurunkan suatu penyakit melainkan Allah juga menurunkan obatnya." (HR. Bukhari, no. 5354)

Hadits tersebut mengisyaratkan bahwa setiap penyakit yang ada di dunia, termasuk diabetes yang erat kaitannya dengan konsumsi pangan berindeks glikemik tinggi, pasti telah disediakan solusinya oleh Allah SWT. Salah satu bentuk solusi tersebut dapat berupa pemanfaatan bahan pangan alami yang memiliki potensi dalam menjaga kestabilan kadar gula darah. Dalam konteks penelitian ini, kombinasi fermentasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccharomyces cerevisiae* pada tepung gandum hitam merupakan bagian dari upaya manusia dalam memanfaatkan ciptaan Allah berupa mikroorganisme untuk menghasilkan produk pangan yang lebih menyehatkan. Allah SWT juga telah memberikan isyarat tentang adanya manfaat penyembuhan yang terkandung dalam produk-produk alami hasil proses biologis sebagaimana firman-Nya dalam QS. An-Nahl ayat 69:

ثُمَّ كُلِي مِنْ كُلِّ الثَّمَرَاتِ فَاسْلُكِي سُبُلَ رَبِّكِ ذُلُلًا يَخْرُجُ مِنْ بُطُونِهَا شَرَابٌ مُخْتَلِفٌ

أَلْوَانُهُ فِيهِ شِفَاءٌ لِلنَّاسِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَةً لِّقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ ﴿٦٩﴾

Artinya : "Dari perut lebah itu keluar minuman yang bermacam-macam warnanya, di dalamnya terdapat obat yang menyembuhkan bagi manusia. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar terdapat tanda (kebesaran Allah) bagi orang-orang yang memikirkan." (QS. An-Nahl: 69).

Menurut Tafsir Al-Mishbah (Shihab, 2002), ayat ini tidak hanya berbicara tentang madu secara spesifik, melainkan mengandung pesan yang lebih luas bahwa Allah SWT menciptakan berbagai makhluk hidup di alam termasuk mikroorganisme dengan menyimpan manfaat dan potensi penyembuhan di dalamnya yang dapat dimanfaatkan oleh manusia melalui akal pikiran dan ilmu pengetahuan. Lafadz **فِيهِ شِفَاءٌ لِّلنَّاسِ** yang berarti "di dalamnya terdapat obat yang menyembuhkan bagi manusia" dapat dipahami secara kontekstual sebagai isyarat bahwa Allah telah menitipkan potensi penyembuhan dan pencegahan penyakit pada berbagai produk alami yang dihasilkan oleh makhluk hidup ciptaan-Nya, termasuk produk fermentasi yang dihasilkan oleh bakteri asam laktat dan khamir *Saccharomyces cerevisiae*. Dengan demikian, roti gandum hitam hasil fermentasi kombinasi BAL dan khamir dalam penelitian ini bukan sekadar produk pangan biasa, melainkan merupakan wujud nyata dari pemanfaatan ciptaan Allah yang mengandung manfaat bagi kesehatan manusia, khususnya dalam upaya pencegahan dan pengendalian diabetes melalui konsumsi pangan dengan nilai estimasi indeks glikemik yang rendah sebagaimana yang telah Allah isyaratkan melalui ciptaan-Nya yang penuh hikmah di alam semesta ini.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

1. Kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccharomyces cerevisiae* berpengaruh nyata terhadap volume pengembangan dan kualitas organoleptik roti gandum hitam yang meliputi warna, aroma, rasa, dan tekstur. Perlakuan L3Y3 (*Lactiplantibacillus plantarum* 4% + *Saccharomyces cerevisiae* 2,5%) menghasilkan volume pengembangan tertinggi yaitu 330,64 cm³ serta memperoleh skor hedonik tertinggi pada seluruh parameter organoleptik yaitu rata-rata 4 sehingga menunjukkan bahwa perlakuan tersebut menghasilkan roti gandum hitam dengan kualitas fisik dan sensoris yang paling disukai panelis.
2. Kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan khamir *Saccharomyces cerevisiae* berpengaruh nyata ($p < 0,05$) terhadap nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) roti gandum hitam secara *in vitro*. Peningkatan konsentrasi BAL dan khamir secara sinergis menurunkan nilai AUC, HI, dan eGI. Perlakuan L3Y3 (BAL 4% + khamir 2,5%) menghasilkan nilai eGI terendah sebesar 55,33 (batas bawah kategori sedang), diikuti L1Y3 sebesar 60,32 dan kontrol sebesar 69,39 yang keduanya berkategori sedang. Fermentasi kombinasi BAL dan khamir terbukti efektif memperlambat hidrolisis pati dan menurunkan respons glikemik roti gandum hitam dibandingkan roti putih sebagai pangan acuan.

6.2 Saran

1. Perlu dilakukan pengujian organoleptik dengan melibatkan panelis terlatih atau semi-terlatih untuk memperoleh penilaian yang lebih objektif terhadap kualitas warna, aroma, tekstur, dan rasa roti gandum hitam.
2. Untuk mendapatkan nilai eGI yang mencapai kategori rendah (<55), disarankan dilakukan penelitian lanjutan dengan mengoptimalkan rasio konsentrasi kombinasi BAL dengan khamir *Saccharomyces cerevisiae*.
3. Perlu dilakukan pengukuran nilai eGI melalui uji *in vivo* pada hewan coba untuk memastikan respons glikemik aktual roti gandum hitam hasil fermentasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, D. N., Sari, L. N. I., Sari, D. R., Probosari, E., Wijayanti, H. S., & Anjani, G. (2020). Analisis kandungan zat gizi, pati resisten, indeks glikemik, beban glikemik dan daya terima cookies tepung pisang kepok (musa paradisiaca) termodifikasi enzimatis dan tepung kacang hijau (*Vigna radiate*). *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 9(3), 101-107.
- Aini, M., Rahayuni, S., Mardina, V., Quranayati, Q., & Asiah, N. (2021). Bakteri *Lactobacillus* spp dan peranannya bagi kehidupan. *Jurnal Jeumpa*, 8(2), 614-624
- Akamine, I. T., Viana, F. D., Rodrigues, L. M., & Costa, L. E. (2023). Role of *Saccharomyces cerevisiae* in volatile compound production and flavor development during bread fermentation: a review. *Food Research International*, 167, 112632
- Akamine, I. T., Viana, F. D., Rodrigues, L. M., & Costa, L. E. (2022). Role of *Saccharomyces cerevisiae* in volatile compound production and flavor development during bread fermentation: a review. *Food Research International*, 167, 112632. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112632>
- Argyri, K., Athanasatou, A., Bouga, M., & Kapsokafalou, M. (2016). The potential of in vitro digestion methods to predict glycemic response of foods and the effect of food matrix and processing. *Journal of Functional Foods*, 24, 500–515.
- Argyri, K., Papakonstantinou, E., Tsiaka, T., Tsironis, V., Kechagias, S., & Kapsokafalou, M. (2013). Predicting the glycaemic response of a mixed meal using in vitro digestion data.
- Arif, B., A., & Budiyanto, A. (2013). Nilai Indeks Glikemik Produk Pangan Dan Faktor-Faktor Yang Memengaruhinya. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 32(3).
- Arif, M, Ernalia, Y., & RoVsdiana, D. (2014). Hubungan Indeks Massa Tubuh Dengan Kadar Gula Darah Puasa Pada Pegawai Sekretariat Daerah Provinsi Riau. *JOM*. 1 (2).
- Arifin, M. H., Susanti, S., & Rahayu, W. P. (2023). Pengembangan adonan roti: pengaruh konsentrasi ragi dan waktu fermentasi terhadap volume spesifik. *Jurnal Teknologi Pangan*, 15(1), 38–46.
- Augustin, L. S. A., et al. (2015). Glycemic index, glycemic load and glycemic response: An International Scientific Consensus Summit. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 25(9), 795–815
- Azzahra, N. D. P. (2024). Pengaruh Penambahan Campuran Bakteri Asam Laktat dengan Khamir Endofit Terhadap Kualitas dan Daya Simpan Roti. Skripsi Unpublished). Program Studi Biologi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim. Malang.
- Badan Standardisasi Nasional. (2006). *SNI 01-2346-2006: Petunjuk Pengujian Organoleptik dan atau Sensori*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional Indonesia.

- Bitrus, J., Amadi, O.C., Nwagu, T.N., Nnamchi, C.I. and Moneke, A.N. (2020) Application of Wild Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) Isolates from Palm Wine and Honey in Baking of Cassava/Wheat Composite Bread. *Food and Nutrition Sciences*, 11, 695-711.
- Bojarczuk, A., Skąpska, S., Khaneghah, A. M., Marszałek, K. 2022. Health benefits of resistant starch: A review of the literature. *Journal of functional foods*, 93, 105094.
- Breton DA, Lopez EM, Palou E, Malo AL. (2020). Antimicrobial activity and storage stability of cell-free supernatants from lactic acid bacteria and their applications with fresh beef. *Journal of Food Control*. 115 (1):1-11.
- Buratti, S., & Benedetti, S. (2016). Alcoholic fermentation using electronic nose and electronic tongue. In *Electronic noses and tongues in food science* (pp. 291-299). Academic Press.
- Butterworth, P. J., Bajka, B. H., Edwards, C. H., Warren, F. J., & Ellis, P. R. (2022). Enzyme kinetic approach for mechanistic insight and predictions of in vivo starch digestibility and the glycaemic index of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 254-264.
- Cao, X., Wu, H., Viejo, C. G., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. (2023). Effects of postharvest processing on aroma formation in roasted coffee—a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 1007-1027.
- Choiriyah, N. A., & Dewi, I. C. (2020). Daya Terima Roti Tawar Mocaf dan Ubi Jalar pada Santriwati Pesantren X. *Media Pertanian*, 5(1), 44-49.
- De Angelis, M., Rizzello, C. G., Alfonsi, G., Arnault, P., Cappelle, S., Di Cagno, R., & Gobbetti, M. (2007). Use of sourdough lactobacilli and oat fibre to decrease the glycaemic index of white wheat bread. *British Journal of Nutrition*, 98(6), 1196-1205.
- Deleu, L. J., Lemmens, E., Redant, L., & Delcour, J. A. (2020). The Major Constituents of Rye (*Secale cereale* L.) Flour and Their Role in the Production of Rye Bread, a Food Product to Which a Multitude of Health Aspects are Ascribed. *Cereal Chemistry*, 97(4), 739-754.
- Demirkesen-Bicak, H., Arici, M., Yaman, M., Karasu, S., & Sagdic, O. (2021). Effect of different fermentation condition on estimated glycemic index, in vitro starch digestibility, and textural and sensory properties of sourdough bread. *Foods*, 10(3), 514.
- Didar, Z., & Haddad Khodaparast, M. H. (2010). Effect of different lactic acid bacteria on phytic acid content and quality of whole-wheat toast bread. *Journal of Nutrition and Food Sciences*, 1(1), 115.
- Dini, R. Z., & Rustanti, N. (2014). Pengaruh Substitusi Tepung Ampas Kelapa Terhadap Nilai Indeks Glikemik, Beban Glikemik, Dan Tingkat Kesukaan Roti. *Journal of Nutrition College*, 3(1), 213–221.
- Dyankowska (2020). Rye (*Secale Cereale* L.) Arabinoxylans: Molecular Structure, Physicochemicals Properties And Their Resulting pro-Health Effects. *Plant Breeding seed science*, 13 (81).

- Dziki, D. (2022). Rye flour and rye bran: New perspectives for use. *Processes*, 10(2), 293
- Echegaray, N., Yilmaz, B., Sharma, H., Kumar, M., Pateiro, M., Ozogul, F., & Lorenzo, J. M. (2023). A novel approach to *Lactiplantibacillus plantarum*: From probiotic properties to the omics insights. *Microbiological Research*, 268, 127289.
- Elferink, H., Bruekers, J. P., Veeneman, G. H., & Boltje, T. J. (2020). A comprehensive overview of substrate specificity of glycoside hydrolases and transporters in the small intestine: “A gut feeling”. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 77(23), 4799-4826.
- Faizah, N., & Ilyas, M. (2022). Warna sebagai indikator kematangan produk pangan: kajian pada proses pemanggangan roti. *Jurnal Teknologi Pangan dan Gizi*, 21(1), 15–22.
- Ferrer-Mairal, A., Peñalva-Lapuente, C., Iglesia, I., Urtasun, L., De Miguel-Etayo, P., Remón, S., ... & Moreno, L. A. (2012). In vitro and in vivo assessment of the glycemic index of bakery products: influence of the reformulation of ingredients. *European journal of nutrition*, 51(8), 947-954.
- Ferrer-Mairal, A., Peñalva-Lapuente, C., Iglesia, I., Urtasun, L., De Miguel-Etayo, P., Remón, S., Moreno, L. A. (2012). In vitro and in vivo assessment of the glycemic index of bakery products: influence of the reformulation of ingredients. *European Journal of Nutrition*, 51(8), 947–954.
- Fransiska.D., Marniza dan Silsia.D. (2021) Karakteristik Fisik, Organoleptik dan Kadar serat Roti Manis Dengan Penambahan Tepung Rebung. *Jurnal Teknologi Pertanian*.11(2), 108-119.
- Gänzle, M. G. (2014). Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. *Food microbiology*, 37, 2-10.
- Gao, Q., Liu, C., & Zheng, X. (2017). Effect of Heat Treatment of Rye Flour on Rye-Wheat Steamed Bread Quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(5), 1109-1119.
- Gautam, M., & Kumar Singh, S. (2022). Rye: A wonder crop with industrially important macromolecules and health benefits. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.020>
- Goñi, I., Garcia-Alonso, A., & Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research*, 17(3), 427–437. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(97\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(97)00010-9)
- Guiné, R. P. (2022). Textural properties of bakery products: A review of instrumental and sensory evaluation studies. *Applied Sciences*, 12(17), 8628
- Hamidah, N., Riyanto, E. T. U., & Uji, E. T. (2019). Kualitas sensori, ukuran pori, indeks glikemik, dan beban glikemik roti tawar substitusi tepung singkong (*Manihot esculenta*) dan tepung tempe. *Media Gizi Indonesia*, 14(2), 154-163.
- Hendarto, D.R., Handayani, A.P., Esterelita, E., Handoko, Y.A. (2019). Mekanisme biokimiawi dan optimalisasi *Lactobacillus bulgaricus* dan

- Streptococcus thermophilus* dalam Pengolahan Yogurt yang Berkualitas. *J. Sains Dasar*, 8 (1) : 13-19
- Hernández-Parada, N., Gutiérrez-Ríos, H. G., Rayas-Duarte, P., González-Ríos, O., Suárez-Quiroz, M. L., Hernández-Estrada, Z. J., ... & Figueroa-Hernández, C. Y. (2025). Screening sourdough starter cultures from yeast and lactic acid bacteria isolated from Mexican cocoa mucilage and coffee pulp for bread quality improvement. *Fermentation*, 11(9), 498.
- Hidayat, N., Meitiniarti, I., Yuliana, N. (2018). Mikroorganisme dan Pemanfaatannya. Malang: *UB Press*.
- Hoerudin. (2012). Indeks Glikemik Buah dan Implikasinya Dalam Pengendalian Kadar Glukosa Darah. *Buletin Teknologi Pascapanen Pertanian*, 8(2), 80–98.
- Hustiany, R. (2016). Reaksi maillard pembentuk citarasa dan warna pada produk pangan. *LMU press*. Banjarmasin
- Istini, I. (2020). Pemanfaatan Plastik Polipropilen Standing Pouch sebagai Salah Satu Kemasan Sterilisasi Peralatan Laboratorium. *Indonesian Journal of Laboratory*.2(3): 44
- Iversen, K. N., Jonsson, K., & Landberg, R. (2022). The effect of rye-based foods on postprandial plasma insulin concentration: the rye factor. *Frontiers in nutrition*, 9, 868938.
- Karki, T. B., Timilsina, P. M., Yadav, A., Pandey, G. R., Joshi, Y., Bhujel, S., Neupane, K. (2017). Selection and Characterization of Potential Baker's Yeast from Indigenous Resources of Nepal. *Biotechnology Research International*. 1–10.
- Katina, K. (2005). *Sourdough: A tool for the improved flavour, texture and shelf-life of wheat bread*. VTT Publications 569. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.
- Kazemi, F., Danaei, G., Farzadfar, F., Malik, V., Parsaeian, M., Pouraram, H., ... & Motlagh, A. R. D. (2020). Glycemic Index (GI) values for major sources of Dietary Carbohydrates in Iran. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 18(3), e99793.
- Kementerian Kesehatan. (2014). Situasi dan Analisis Diabetes. Jakarta: Pusat Data dan Informasi. Nasution, F., Andilala., Siregar, A.A. (2021). Faktor Resiko Kejadian Diabetes Mellitus. *Jurnal Ilmu Kesehatan*, 9(2), 94-102.
- Khazalina, T. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* dalam Pembuatan Produk Halal Berbasis Bioteknologi Konvensional dan Rekayasa Genetika. *Journal of Halal Product and Research (JHPR)*, 3(2), 88–94.
- Koj, K., & Pejcz, E. (2023). Rye dietary fiber components upon the influence of fermentation inoculated with probiotic microorganisms. *Molecules*, 28(4), 1910.
- Kurniadi, M., Andriani, M., Fatur Rahman, F., & Damayanti, E. (2013). Karakteristik fisikokimia tepung biji sorghum (*Sorghum bicolor* L.) terfermentasi bakteri asam laktat *Lactobacillus acidophilus*. *Agritech*, 33(3), 288-295.

- Kusmiyati, N., Utami, U., Pratama, M. R., & Harianie, L. (2024). Analisis Pertumbuhan Khamir Endofit Buah Salak (*Salacca edulis Reinw.*) dengan Penambahan Zinc. *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 17(2), 351-360.
- Kusnandar, F., Andarwulan, N., Hariyadi, P., & Nurhayati, N. (2022). *Kimia Pangan: Komponen Makro* (2nd ed.). Jakarta: PT Dian Rakyat.
- Kusnedi, R. (2021). Pengaruh Penambahan Pengembang Roti terhadap Parameter Organoleptik pada Pembuatan Roti Manis. *Jurnal British*, 1(2), 60–71.
- Lappi, J., Mykkänen, H., Knudsen, K. E. B., Kirjavainen, P., Katina, K., Pihlajamäki, J., & Kolehmainen, M. (2014). Postprandial glucose metabolism and SCFA after consuming wholegrain rye bread and wheat bread enriched with bioprocessed rye bran in individuals with mild gastrointestinal symptoms. *Nutrition journal*, 13, 1-9.
- Lata., P., Sharma, K. B., Rangra., S., & Kumari, R. (2023). Probiotic Characterization Of *Saccaromyces cerevisiae* Y196 dan Y197 isolated from rice chhang-a fermented beverage of Lahaul Spiti. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 12 (5).
- Lau, E., Abubakar, F. A., Tan, T. C., & Lee, S. Y. (2021). 3-Methyl-1-butanol as a key volatile aroma compound in bread crumb: origin, formation, and sensory significance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(15), 4398–440
- Lestari, A. D., & Maharani, S. (2017) Pengaruh Substitusi Tepung Talas Belitung (*Xanthosoma Sagittifolium*) terhadap Karakteristik Fisika, Kimia dan Tingkat Kesukaan Konsumen pada Roti Tawar. *EDUFORTECH*, 2(2),96- 106.
- Lestari, E., Sandri, D., Fatimah, F., & Umaira, U. (2017). Volume kembang adonan dan sensory roti manis yang dibuat dari modified talipuk flour (MOTAF). *Jurnal Teknologi & Industri Hasil Pertanian*, 24(2), 113–120. <https://doi.org/10.23960/jtihp.v24i2.113-120>
- Lilir, F. B., Palar, C. K. M., & Lontaan, N. N. (2021). Pengaruh Lama Pengeringan Terhadap Proses Pengolahan Kerupuk Kulit Sapi. *Zootec*, 41(1), 214-222.
- Lin, A. H. M., Lee, B. H., Nichols, B. L., Quezada-Calvillo, R., Rose, D. R., Naim, H. Y., & Hamaker, B. R. (2012). Starch source influences dietary glucose generation at the mucosal α -glucosidase level. *Journal of Biological Chemistry*, 287(44), 36917-36921.
- Litwinek, D., Boreczek, J., Gambuś, H., Buksa, K., Berski, W., & Kowalczyk, M (2022). Developing lactic acid bacteria starter cultures for wholemeal rye flour bread with improved functionality, nutritional value, taste, appearance and safety. *PLoS One*, 17(1), e0261677.
- Luca, L., Oroian, M., & Amariei, S. (2021). Role of organic acids in the formation of bread aroma during fermentation with lactic acid bacteria. *Applied Sciences*, 11(9), 3944
- Magliano, D. J., & Boyko, E. J. (Eds.) on behalf of the IDF Diabetes Atlas 10th edition Scientific Committee. (2021). IDF Diabetes Atlas (10th ed.).

- International Diabetes Federation. ISBN: 978-2-930229-98-0.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK581934/>
- Majid, F. R., Hidayat, N., & Waluyo, W. (2017). Variasi Penambahan Tepung Daun Kelor (*Moringa Oleifera* Lam.) pada Pembuatan Flakes Ditinjau dari Sifat Fisik, Sifat Organoleptik dan Kadar Kalsium. *Jurnal Nutrisia*, 19(1), 31-35.
- Maya, F. N., & Alami, N. H. (2019). Uji Potensi Isolat Khamir Dari Rhizosfer Mangrove Wonorejo dan Gunung Anyar Sebagai Agen Penghasil IAA (Indole Acetic Acid). *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 8(1), 4-8
- Mendis, M. and Simsek, S. (2014) Arabinoxylans and Human Health. *Food Hydrocolloids*, 42, 239-243. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.022>.
- Montes, G., Nardi, T., Giacosa, S., Torchio, F., Budroni, M., Mannazzu, I., Pagliaro, A., Rolle, L., & Schneider, R. (2016). Impact of *Saccharomyces cerevisiae* metabolites produced during fermentation on bread quality parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(7), 1152–1164. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1244153>
- Motumona., Z., A (2025). Uji Stimulasi Probiotik Bifidobacterium Longum Dengan Ekstrak Etanol Daun Putat (*Barringtonia Acutangula* L.) Dan Kemampuan Dalam Menghambat *Escherichia Coli*. Skripsi. Universitas Sriwijaya.
- Mou, T., Xu, R., Li, Q., Li, J., Liu, S., Ao, X., ... & Liu, A. (2025). Screening of Antifungal Lactic Acid Bacteria and Their Impact on the Quality and Shelf Life of Rye Bran Sourdough Bread. *Foods*, 14(7), 1253
- Muflihati, I. (2017). Perlakuan pada roti gandum untuk menurunkan indeks glikemiknya. *Jurnal Ilmu Pangan dan Hasil Pertanian*, 1(2), 37-49.
- Mulyadi, E. P. Perbandingan Respon Glukosa Darah Terhadap Macam Varian Roti Isi Berdasarkan Nilai Glycemic Loadnya. Skripsi Univ syraif Jakarta 2014.
- Munteanu, G. M., Voicu, G., Ferdeş, M., Ştefan, E. M., Constantin, G. A., & Tudor, P. (2019). Dynamics of Fermentation Process of Bread Dough Prepared with Different Types of Yeast. Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, *Food Industry*, 20(4), 575-584.
- Nasution, F., Andilala., Siregar, A.A. (2021). Faktor Resiko Kejadian Diabetes Mellitus. *Jurnal Ilmu Kesehatan*, 9(2), 94-102.
- Nawika, N., Astuti, P., & Santosa, H. L. (2017). Inovasi Pembuatan Roti Tawar dengan Penambahan Rumput Laut (*Eucheuma* sp.) untuk Meningkatkan Kandungan Serat. *Jurnal Kompetensi Teknik*, 9(1), 60-67.
- Nisaa, Y. H. (2020). Isolasi dan Uji Kemampuan Khamir Endofit dari Daging dan Kulit Buah Mangga (*Mangifera indica* l.) Varietas Podang sebagai Pengembang Adonan Roti. Skripsi. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim. Malang

- Nurhayati, A. D., Rimbawan, R., Anwar, F., & Winarto, A. (2019). Potensi penggunaan metode in vitro dalam memperkirakan pemeringkatan indeks glikemik in vivo pada beberapa varietas beras yang dimasak. *Indonesian Journal of Human Nutrition*, 6(2), 119-138.
- Nurhayati, A. D., Rimbawan, R., Anwar, F., & Winarto, A. (2019). Potensi penggunaan metode in vitro dalam memperkirakan pemeringkatan indeks glikemik in vivo pada beberapa varietas beras yang dimasak. *Indonesian Journal of Human Nutrition*, 6(2), 119–138.
- Nurhidajah et al., (2015). Kadar Serat Pangan dan Daya Cerna Pati Nasi Merah yang Diperkaya Kappa-karragean dan Ekstrak Antosianin Dengan Variasi Metode Pengolahan. *The 2nd University Research Coloqium*, 5 (2),
- Oručević Žuljević, S., & Spaho, N. (2024). Bread aroma and flavour creation factors. Dalam A. Dzafic (Ed.), *[Judul buku IntechOpen]*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/chapters/89529>
- Paramita, T. A., Damat, D., & Wahyudi, V. A. (2022). Studi Suhu dan Waktu Cooling Pembuatan Roti Manis Pada Karakteristik Kimia dan Organoleptik. *Food Technology and Halal Science Journal*, 5(2), 154-168.
- Pasqualoni, I., Tolve, R., Simonato, B., & Bianchi, F. (2024). The impact of selected ingredients on the predicted glycemic index and technological properties of bread. *Foods*, 13(16), 2488. <https://doi.org/10.3390/foods13162488>
- Penido FCL, Piló FB, Sandes SH de C, Nunes ÁC, Colen G, Oliveira E de S, Rosa CA, Lacerda ICA (2018). Selection of starter cultures for the production of sour cassava starch in a pilot-scale fermentation process. *Brazilian J Microbiol* 49:823–831. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.02.001>
- Pontonio, E., Perri, G., Calasso, M., Celano, G., Verni, M., & Rizzello, C. G. (2025). Unveiling the impact of traditional sourdough propagation methods on the microbiological, biochemical, sensory, and technological properties of sourdough and bread: a comprehensive first study. *Applied Food Research*, 5, 101037
- Puspita, D. (2020). Isolasi, identifikasi dan uji produksi yeast yang diisolasi dari nira kelapa. *Biosfer: Jurnal Biologi Dan Pendidikan Biologi*, 5(1), 1-5.
- Ramos, L., Alonso-Hernando, A., Martínez-Castro, M., Morán-Pérez, J.A., Cabrero-Lobato, P., Pascual-Maté, A., et al. (2021). Sourdough Biotechnology Applied to Gluten-Free Baked Goods: Rescuing the Tradition. *Foods*. 10:1498
- Ridhani, M. A., & Aini, N. (2021). Potensi Penambahan Berbagai Jenis Gula Terhadap Sifat Sensori dan Fisikokimia Roti Manis. *Pasundan Food Technology Journal (PFTJ)*. 8(3), 61-68
- Rinaldi, A. (2019). Perbedaan Nilai Estimasi Indeks Glikemik dan Nilai Beban Glikemik Nasi Merah dan Nasi Kecambah Beras Merah Varietas Lokal Merah Wangi secara In-Vitro. *Skripsi*. Universitas Brawijaya. Malang.

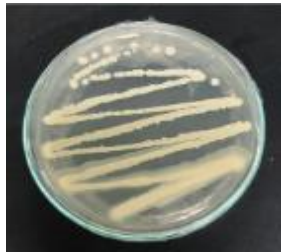
- Rozali, Z. F. (2024). Mini review: Peran fisiologis pati resisten sebagai substrat bakteri kolon dalam produksi asam lemak rantai pendek. *Jurnal Bioleuser*, 8(1), 26-32.
- Rusda (2019). Perbedaan Nilai Indek Glikemik Beras Putih Variates IR 64 Dengan Cara Pemasakan Menggunakan Rice Cooker Dan Dandang. *Skripsi*. Universitas Brawijaya. Malang.
- Sachriani, S., & Yulianti, Y. (2021). Analisis kualitas sensori dan kandungan gizi roti tawar tepung oatmeal sebagai pengembangan produk pangan fungsional. *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 7(2), 26-35.
- Sack, F.M., Carey, V.J., Anderson, C.A.M., Miller, E.R., Copeland, T., Charleston, J., Harshfield, B.J., Laranjo, N., McCarron, P., Swain, J., White, K., Yee, K., dan Appel, L.J. (2014). Effects of High vs Low Glycemic Index of Dietary Carbohydrate on Cardiovascular Disease Risk Factors and Insulin Sensitivity: The OmniCarb Randomized Clinical Trial. *JAMA*, 312(23), 2531-2541.
- Saeed, F., Afzaal, M., Abdullah, M., Niaz, B., Asif Khan, M., Hussain, M., Adnan Nasir, M., & Siddeeg, A. (2022). Comparative study of biochemical properties, anti-nutritional profile, and antioxidant activity of newly developed rye variants. *International Journal of Food Properties*, 25(1), 608–616. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2053708>
- Saepudin, L., Setiawan, Y., & Sari, P. D. (2017). Pengaruh Perbandingan Substitusi Tepung Sukun dan Tepung Terigu dalam Pembuatan Roti Manis. *AGROSCIENCE*, 7(1), 227-243
- Sagili, V.S., Chakrabarti, P., Jayanty, S., Kardile, H. and Sathuvalli, V. (2022) ‘Review: The glycemic index and human health with an emphasis on potatoes, *Foods*, 11, 2302. <https://doi.org/10.3390/foods11152302>
- Sagilli, V. S., Chakrabarti, P., Jayanty, S., Kardile, H., dan Sathuvalli, V. (2020). The Glycemic Index and Human Health with an Emphasis on Potatoes. *Foods*, 11, 2302. <https://doi.org/10.3390/foods11152302>
- Sari, I. I., Hendrasty, H. K., & Astuti, R. D. (2024). Pengaruh Proofing dan Konsentrasi Ragi Terhadap Kualitas Mutu Roti Goreng. *Bulletin Agro Industri*, 51(2), 25–33
- Sari, Y.I. (2020). Isolasi dan Karakterisasi Khamir pada Buah Salak Pondoh (*Salacca edulis* Reinw.) sebagai Kandidat Pengembang Roti. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Scazzina, F., Del Rio, D., Pellegrini, N., & Brighenti, F. (2009). Sourdough bread: Starch digestibility and postprandial glycemic response. *Journal of Cereal Science*, 49(3), 419-421.
- Sciarini, L. S., Bustos, M. C., Vignola, M. B., Paesani, C., Salinas, C. N., & Perez, G. T. (2017). A study on fibre addition to gluten free bread: Its effects on bread quality and in vitro digestibility. *Journal of food science and technology*, 54(1), 244-252.

- Setiarto B., R. H., Laksmi Jenie, B. S., Faridah, D. N., & Saskiawan, I. (2015). Study of Development Resistant Starch Contained in Food Ingredients as Prebiotic Source. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 20(3), 191–200. <https://doi.org/10.18343/jipi.20.3.191>.
- Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178–202.
- Shihab, M. Q. (2002). Tafsir al-mishbah. *Jakarta: lentera hati*, 2, 52-54.
- Shihab, M. Q. (2002). *Tafsir Al-Mishbah: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an* (Jilid 15). Jakarta: Lentera Hati.
- Silva, L. A., Lopes Neto, J. H. P., & Cardarelli, H. R. (2019). Exopolysaccharides produced by *Lactobacillus plantarum*: technological properties, biological activity, and potential application in the food industry. *Annals of microbiology*, 69(4), 321-328.
- Sitepu, K. M. (2019). Penentuan Konsentrasi Ragi pada Pembuatan Roti. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Agrokompleks*, 2(1), 71–77.
- Srivastava, S., Raut, H. N., Puntambekar, H., & Parihar, V. S. (2022). Secondary metabolites of yeast in Maillard reaction and color development during bread baking. *Fermentation*, 8(11), 628.
- Sun, Y., Zhong, C., Zhou, Z., Lei, Z., & Langrish, T. A. (2022). A review of in vitro methods for measuring the glycemic index of single foods: understanding the interaction of mass transfer and reaction engineering by dimensional analysis. *Processes*, 10 (4), 759.
- Sunani, S. (2023). Indeks Glikemik (IG) dan Beban Glikemik (BG) Sebagai Faktor Resiko Diabetes Mellitus Tipe II Pada Pangan Sumber Karbohidrat. *Farmaka*, 21(1).
- Sunani, S. (2023). Indeks Glikemik (IG) dan Beban Glikemik (BG) Sebagai Faktor Resiko Diabetes Mellitus Tipe II Pada Pangan Sumber Karbohidrat. *Farmaka*, 21(1).
- Tulasi, M. I., Foeh, N. D., & Detha, A. I. (2024). Studi Literatur Senyawa Metabolit Bakteri Asam Laktat Dan Kegunaannya Dalam Mengoptimalkan Kesehatan Hewan. *Jurnal Veteriner Nusantara*, 7(2), 262-274.
- Utami, U. (2021). *Immunomodulator Probiotik Bakteri Asam Laktat*. Malang: UIN Maliki Press.
- Vatanasuchart, N., Niyomwit, B., & Wongkrajang, K. (2012). Resistant starch content, in vitro starch digestibility and physicochemical properties of flour and starch from Thai bananas. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 6(2), 259–271.
- Vatanasuchart, N., Niyomwit, B., & Wongkrajang, K. (2012). Resistent Starch Content, in Vitro Starch Digestibility and Physico-Chemical Properties o Flour and Starch From Thai Bananas. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 6(2), 259–271.

- Vivek, K., & Venkitasamy, C. (2023). Role and applications of Fungi in Food and Fermentation Technology. In *Fungal resources for sustainable economy: current status and future perspectives* (pp. 71-87). Singapore: *Springer Nature Singapore*.
- Wahyuni. (2015). Konversi Enzimatik Pengujian Aktivitas Enzim α -amilase. *Artikel*. ITB : Bandung.
- Wang, H., Han, P., Zhang, P., & Li, Y. (2024). Influence of yeast concentrations and fermentation durations on the physical properties of white bread. *LWT*, 198, 116063
- Wang, Y., Maina, N. H., Coda, R., & Katina, K. (2021). Challenges and opportunities for wheat alternative grains in breadmaking: Ex-situ-versus in-situ-produced dextran. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 232-244.
- Watanabe, M., Uchida, N., Fujita, K., Yoshino, T., & Sakaguchi, T. (2016). Bread and Effervescent Beverage Productions with Local Microbes for The Local Revitalization. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 6(3), 381-384.
- Widanagamage, R. D., Ekanayake, S., & Welihinda, J. (2009). Carbohydrate-rich foods: glycaemic indices and the effect of constituent macronutrients. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(suppl. 4), 215–223.
- Widiastutik, N., & Alami, N. H. (2014). Isolasi dan identifikasi Yeast dari Rhizosfer *Rhizophora mucronata* Wonorejo. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 3(1), 11-16.
- Woolnough, J. W., Bird, A. R., Monro, J. A., & Brennan, C. S. (2010). The effect of a brief salivary α -amylase exposure during chewing on subsequent in vitro starch digestion curve profiles. *International journal of molecular sciences*, 11(8), 2780-2790.
- Yulvizar, C., Ismail, Y. S., Dewiyanti, I., & Defira, C. N. (2023). Aktivitas Bakteriosin Bakteri Asam Laktat (Bk-01) dalam Menghambat *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli*. *Jurnal Bioleuser*, 7(1).
- Zahro, F. (2014). Isolasi Dan Identifikasi Bakteri Asam Laktat Asal Fermentasi Markisa Ungu (*Passiflora Edulis* Var. *Sims*) Sebagai Penghasil Eksopolisakarida. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Zannini, E., Bravo Núñez, Á., Sahin, A. W., & Arendt, E. K. (2022). Arabinoxylans as functional food ingredients: A review. *Foods*, 11(7), 1026.
- Zhang, Y., Momoisea, P., Lin, Q., Liang, J., Burrow, K., & Serventi, L. (2023). Evaluation of sensory and physicochemical characteristics of vitamin B12 enriched whole-meal sourdough bread fermented with *Propionibacterium freudenreichii*. *Sustainability*, 15(10), 8157. <https://doi.org/10.3390/su15108157>
- Zohri, A. A., Fadel, M., Hmad, M., & El-sharkawey, H. F. (2017). Effect of Nitrogen Sources and Vitamins Addition on Baker's Yeast Fermentation Activity. *Egyptian Sugar Journal*. 9, 57-66.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Peremajaan Isolat Bakteri Asam Laktat dan Khamir *Saccharomyces cerevisiae*



Bakteri Asam laktat (BAL)



Khamir *saccharomyces cerevisiae*

Lampiran 2. Hasil Pembuatan starter Bakteri Asam Laktat dan Hasil Pemanenan Isolat Khamir *Saccharomyces cerevisiae*



Bakteri asam laktat (BAL)



Khamir *saccharomyces cerevisiae*

Lampiran 3. Perhitungan Volume Pengembangan Adonan Roti Pada Perlakuan Variasi Konsentrasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir *Saccharomyces cerevisiae*

- Cara Menghitung :

$$V = \pi r^2 t$$

Keterangan :

V = Volume tabung

$\pi = 22/7$ atau 3,14

r = jari-jari tabung

t = tinggi tabung

Diketahui : r = 4,5 cm

t = 2 cm

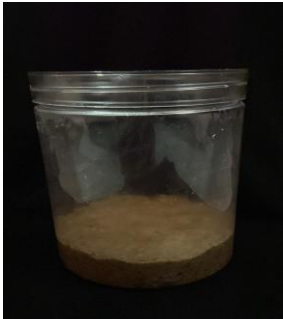
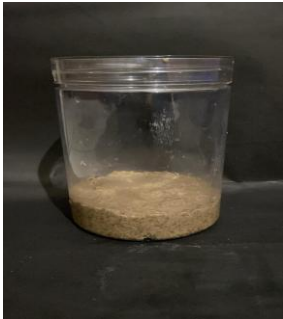
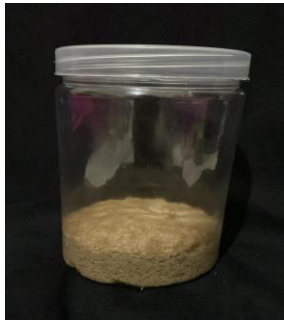
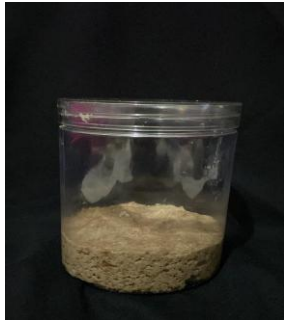
$$\begin{aligned} V &= 3,14 \times 4,5^2 \times 2 \\ &= 222,54 \end{aligned}$$

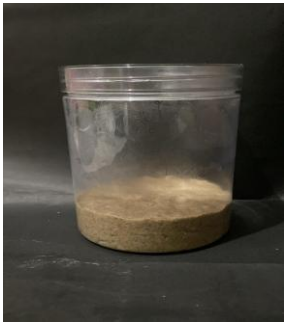
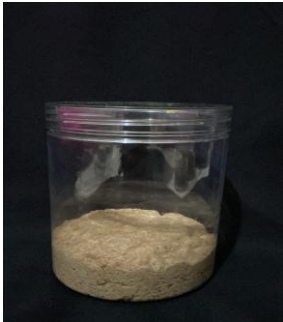
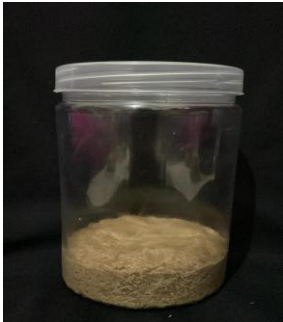
Lampiran 4. Data Hasil Pengukuran Volume Pengembangan Adonan Roti Gandum Hitam Dari Beberapa Semua Perlakuan pada Setiap Interval Waktu (0 – 720 menit)

Waktu (menit)	L1Y1	L1Y2	L1Y3	L2Y1	L2Y2	L2Y3	L3Y1	L3Y2	L3Y3	Kontrol
0	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75
30	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75
60	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75
90	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75	190,75
120	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	190,75
150	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	190,75
180	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	190,75
210	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	241,62	190,75
240	222,54	222,54	241,62	222,54	222,54	222,54	222,54	222,54	241,62	190,75
270	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	190,75
300	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	254,34	190,75
330	241,62	241,62	254,34	241,62	241,62	241,62	241,62	241,62	254,34	190,75
360	254,34	254,34	254,34	254,34	241,62	254,34	254,34	254,34	267,05	190,75
390	254,34	254,34	254,34	254,34	254,34	254,34	254,34	254,34	267,05	190,75
420	254,34	254,34	267,05	254,34	254,34	254,34	254,34	254,34	267,05	190,75
450	254,34	267,05	267,05	267,05	254,34	267,05	267,05	254,34	273,41	190,75
480	267,05	267,05	267,05	267,05	254,34	267,05	267,05	267,05	273,41	190,75
510	267,05	267,05	267,05	267,05	267,05	267,05	267,05	267,05	273,41	190,75
540	273,41	273,41	273,41	273,41	267,05	273,41	273,41	267,05	286,13	190,75
570	273,41	273,41	273,41	273,41	267,05	273,41	273,41	273,41	286,13	190,75
600	273,41	273,41	273,41	273,41	273,41	286,13	273,41	273,41	286,13	190,75
630	273,41	273,41	273,41	286,13	273,41	286,13	273,41	273,41	286,13	190,75

660	286,13	286,13	286,13	286,13	273,41	286,13	286,13	273,41	317,92	190,75
690	286,13	286,13	286,13	286,13	286,13	317,92	286,13	286,13	317,92	190,75
720	286,13	286,13	317,92	286,13	286,13	317,92	286,13	286,13	330,64	190,75

Lampiran 5. Dokumentasi Pengembangan Adonan Roti Gandum Hitam Sebelum dan Sesudah Fermentasi

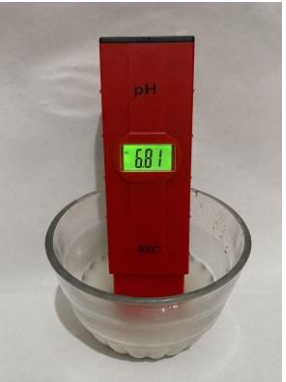
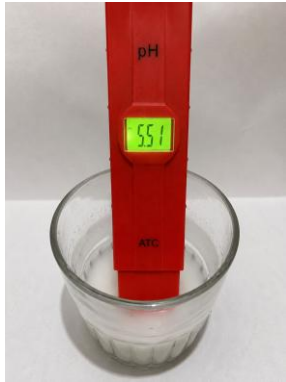
Perlakuan	Menit ke-0	Menit ke-720
Kontrol		
L1Y1		
L1Y2		
L1Y3		

L2Y1		
L2Y2		
L2Y3		
L3Y1		
L3Y2		

L3Y3		
-------------	---	--

Keterangan : Menit ke- 0 = sebelum fermentasi, Menit ke- 720 = sesudah fermentasi (12 jam)

Lampiran 6. Dokumentasi Pengukuran pH Adonan Roti Gandum Hitam Sebelum dan Sesudah Fermentasi

Perlakuan	Sebelum Fermentasi	Sesudah Fermentasi
Kontrol	 pH = 6,81	 pH = 6,69
L1Y3	 pH = 6,81	 pH = 5,51
L3Y3	 pH = 6,90	 pH = 5,34

Lampiran 7. Dokumentasi Tekstur Roti Gandum Hitam Antar Perlakuan

		
Kontrol	L1Y1	L1Y2
		
L1Y3	L2Y1	L2Y2
		
L2Y3	L3Y1	L3Y2
		
L3Y3		

Lampiran 8. Dokumentasi Warna Roti Gandum Hitam Antar Perlakuan

		
Kontrol	L1Y1	L1Y2
		
L1Y3	L2Y1	L2Y2
		
L2Y3	L3Y1	L3Y2
		
L3Y3		

Lampiran 9. Perhitungan Rata-rata Nilai Uji Organoleptik Roti Gandum Hitam

- **Cara Menghitung :**

$$\bar{x} = \sum x_i / n$$

Keterangan :

$\bar{x}$ = rata-rata nilai organoleptik per perlakuan

$\sum x_i$ = jumlah seluruh skor penilaian panelis pada setiap parameter

n = jumlah panelis (20 orang)

- **Perhitungan Rata-rata Nilai Organoleptik per Perlakuan :**

Contoh : Kontrol (BAL 0% + Khamir 0%)

Rasa : $\bar{x} = \sum x_i / n = 44 / 20 = 2,2$

Aroma : $\bar{x} = \sum x_i / n = 48 / 20 = 2,4$

Warna : $\bar{x} = \sum x_i / n = 52 / 20 = 2,6$

Tekstur : $\bar{x} = \sum x_i / n = 48 / 20 = 2,4$

Lampiran 10. Data Uji Organoleptik Pada Perlakuan Kombinasi Bakteri Asam Laktat dan Khamir *Saccharomyces cerevisiae*

Perlakuan	Rasa	Aroma	Warna	Tekstur	Total	Rata - rata
Kontrol	2,2	2,4	2,6	2,4	9,6	2,4
L1Y1	3,4	3,2	3	3,1	12,7	3,2
L1Y2	3,6	3	3,4	4,1	14,1	3,5
L1Y3	4,3	4,6	4,6	4,1	17,6	4,4
L2Y1	3,4	3,6	3,4	3,8	14,2	3,6
L2Y2	3,6	3,6	3,4	3,8	14,4	3,6
L2Y3	3,3	3,2	3,4	3,3	13,2	3,3
L3Y1	3,4	3,2	3,6	3,4	13,6	3,4
L3Y2	3,6	3,6	3,6	4	14,8	3,7
L3Y3	4,6	4,4	4,6	4,5	18,1	4,5

Lampiran 11. Hasil Uji *Kruskall Wallis*

Test Statistics^{a,b}

	Rasa
Kruskal-Wallis H	60.591
df	9
Asymp. Sig.	.000

a. Kruskal Wallis Test

Test Statistics^{a,b}

	Warna
Kruskal-Wallis H	65.364
df	9
Asymp. Sig.	.000

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable:
Perlakuan

Test Statistics^{a,b}

	Aroma
Kruskal-Wallis H	66.124
df	9
Asymp. Sig.	.000

a. Kruskal Wallis Test

Test Statistics^{a,b}

	Tekstur
Kruskal-Wallis H	67.382
df	9
Asymp. Sig.	.000

a. Kruskal Wallis Test

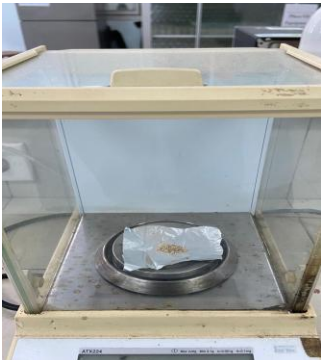
b. Grouping Variable:
Perlakuan

Lampiran 12. Hasil Uji Lanjut *Mann Whitney*

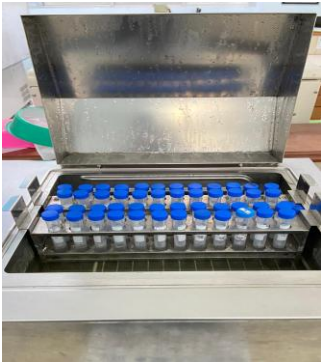
Sampel	Warna	Aroma	Tekstur	Rasa
Kontrol	2,60 ± 0,50 ^a	2,40 ± 0,75 ^a	2,35 ± 0,75 ^a	2,15 ± 0,75 ^a
L1Y1	3,00 ± 0,92 ^{ab}	3,15 ± 0,99 ^{ab}	3,10 ± 0,91 ^{ab}	3,45 ± 0,94 ^b
L1Y2	3,45 ± 0,76 ^b	3,00 ± 0,79 ^{ab}	4,10 ± 0,72 ^c	3,55 ± 0,76 ^b
L1Y3	4,63 ± 0,76 ^c	4,58 ± 0,77 ^c	4,11 ± 0,94 ^c	4,26 ± 0,99 ^c
L2Y1	3,40 ± 0,94 ^b	3,55 ± 0,83 ^b	3,85 ± 0,67 ^{bc}	3,45 ± 1,15 ^b
L2Y2	3,40 ± 0,99 ^b	3,55 ± 0,89 ^b	3,85 ± 0,99 ^{bc}	3,55 ± 0,94 ^b
L2Y3	3,45 ± 0,89 ^b	3,25 ± 1,12 ^b	3,30 ± 0,66 ^b	3,30 ± 1,08 ^b
L3Y1	3,55 ± 1,00 ^b	3,20 ± 0,89 ^b	3,35 ± 0,88 ^b	3,35 ± 1,09 ^b
L3Y2	3,55 ± 0,94 ^b	3,55 ± 1,00 ^b	4,00 ± 0,92 ^c	3,55 ± 0,83 ^b
L3Y3	4,55 ± 0,69 ^c	4,45 ± 0,83 ^c	4,50 ± 0,89 ^c	4,60 ± 0,68 ^c

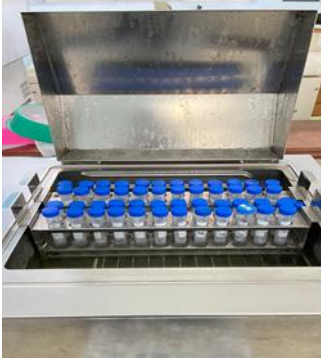
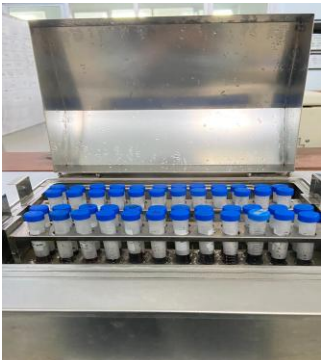
Keterangan: Data dinyatakan sebagai rata-rata ± standar deviasi. Notasi huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan adanya perbedaan nyata berdasarkan uji Mann–Whitney pada taraf 5%.

Lampiran 13. Dokumentasi Proses Pengujian estimated *Glycemic Index* (eGI) pada Roti Gandum Hitam Kombinasi Bakteri Asam Laktat (BAL) dan Khamir *Saccharomyces cerevisiae*

No.	Dokumentasi	Keterangan
1		Penghalusan roti gandum hitam dan roti putih (<i>food reference</i>) menggunakan mortar dan alu hingga menjadi serbuk halus
2		Penimbangan masing-masing sampel sebanyak 50 mg menggunakan timbangan analitik
3		Memasukkan sampel ke dalam tabung reaksi yang telah diberi label sesuai perlakuan
4		Penambahan 10 ml larutan HCl buffer pH 1,5 pada setiap masing-masing perlakuan

5		Penambahan enzim pepsin sebanyak 0,2 ml kedalam campuran HCL buffer pH 1,5 untuk mensimulasikan kondisi pencernaan lambung
6		Inkubasi pertama dalam waterbath selama 1 jam pada suhu 40°C
7		Penambahan larutan NaOH 0,1 N untuk menaikkan pH larutan sampel dan pengukuran pH menggunakan pH meter digital hingga mencapai pH 6,9-7,0 untuk mensimulasikan kondisi usus halus
8		Inkubasi kedua dalam waterbath pada suhu 37°C

9		Penambahan enzim α-amilase 1 ml ke dalam tabung reaksi untuk menghidrolisis pati
10		Pengambilan aliquot sebanyak 1 ml pada masing-masing interval waktu (0, 30, 60, 90, dan 120 menit)
11		Pemanasan aliquot pada suhu 100°C selama 10 menit untuk menginaktivasi enzim
12		Penambahan 3 ml sodium asetat buffer pH 4,5 dan 60 mikrolit enzim glukamilase untuk menghidrolisis ikatan α-1,6-glikosidik pada amilopektin

13		Inkubasi ketiga dalam waterbath pada suhu 60°C selama 45 menit
14		Penambahan 1,5 ml reagen DNS (<i>Dinitrosalicylic Acid</i>) sebagai reagen untuk deteksi glukosa
15		Pemanasan kembali pada suhu 100°C selama 10 menit hingga terbentuk warna merah kecoklatan yang menunjukkan adanya gula pereduksi
16		Hasil warna setelah pengukuran absorbansi larutan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 575 nm untuk menentukan kadar glukosa hasil hidrolisis pati

Lampiran 14. Data Absorbansi, Kadar Glukosa, dan Kadar Pati Terhidrolisis Sampel Roti Gandum Hitam

Sampel	Waktu (menit)	U1 Absorbansi	U1 Kadar Glukosa	U2 Absorbansi	U2 Kadar Glukosa	U3 Absorbansi	U3 Kadar Glukosa	Mean Kadar Glukosa	Kadar Pati ($\times 0,9$)
Kontrol	0	0,00253	1,56922	0,00205	1,33572	0,00205	1,33252	3,34912	3,01421
	30	0,00312	1,85992	0,00246	1,53892	0,0023	1,45602	3,88419	3,49577
	60	0,00326	1,93002	0,00315	1,87582	0,00246	1,53562	4,31772	3,88595
	90	0,00363	2,11542	0,00347	2,03422	0,00344	2,01862	4,82252	4,34027
	120	0,00406	2,32702	0,00355	2,07542	0,00341	2,00522	5,07085	4,56377
L1Y3	0	0,00108	0,85612	0,00044	0,54152	0,00018	0,41592	1,53629	1,38266
	30	0,00194	1,27882	0,00185	1,23532	0,00104	0,83632	2,79292	2,51363
	60	0,00205	1,33702	0,00204	1,32862	0,00184	1,23012	3,07569	2,76812
	90	0,00223	1,42122	0,00224	1,42762	0,00224	1,42832	3,32495	2,99246
	120	0,00249	1,55332	0,00226	1,43862	0,00226	1,44012	3,47199	3,12479
L3Y3	0	0,00032	0,48276	0,00018	0,23512	0,00056	0,21692	0,65255	0,5873
	30	0,00132	0,33912	0,00023	0,43951	0,00134	0,34012	0,89201	0,80281
	60	0,00184	1,23352	0,00171	1,16692	0,00158	1,10352	2,76829	2,49146
	90	0,0021	1,35912	0,00183	1,2278	0,00181	1,21742	2,99273	2,69346
	120	0,00228	1,44672	0,00205	1,33542	0,00222	1,42112	3,25585	2,93027

Keterangan : U1 (Ulangan 1), U2 (Ulangan 2), U3 (Ulangan 3), L1Y3 (BAL 2% + Khamir 2,5%), L3Y3 (BAL 4% + Khamir 2,5%)

- **Data Rata-Rata Kadar Pati Terhidrolisis (mg/L) Roti Gandum Hitam pada Setiap Interval Waktu**

Perlakuan	0 menit	30 menit	60 menit	90 menit	120 menit
Kontrol	3,01	3,49	3,88	4,34	4,96
L1Y3	1,38	2,51	2,76	2,99	3,12
L3Y3	0,58	1,80	2,49	2,69	2,93

Lampiran 15. Cara Perhitungan Kadar Glukosa Hidrolisis Pati

- **Contoh Perhitungan : Perlakuan Kontrol (Menit ke-0)**

Langkah 1. Data Absorbansi dari Spektrofotometer

Nilai absorbansi yang terukur pada perlakuan Kontrol menit ke-0 :

- Ulangan Absorbansi :

$$U1 = 0,00253$$

$$U2 = 0,00205$$

$$U3 = 0,00205$$

Langkah 2. Konversi Absorbansi kemudian Kadar Glukosa

- Menggunakan persamaan regresi linear kurva standar:

$$y = 0,002x - 0,0007$$

Dimana y = absorbansi

x = kadar glukosa (mg/L)

$$\text{Maka: } x = (y + 0,0007) / 0,002$$

- Ulangan 1:

$$= (0,00253 + 0,0007) / 0,002$$

$$= 0,00323 / 0,002$$

$$= 1,615 \text{ mg/L} \approx 1,56922 \text{ mg/L}$$

- Ulangan 2:

$$= (0,00205 + 0,0007) / 0,002$$

$$= 0,00275 / 0,002$$

$$= 1,375 \text{ mg/L} \approx 1,33572 \text{ mg/L}$$

- Ulangan 3:

$$= (0,00205 + 0,0007) / 0,002$$

$$= 0,00275 / 0,002$$

$$= 1,375 \text{ mg/L} \approx 1,33252 \text{ mg/L}$$

Langkah 3. Rata-rata Kadar Glukosa

$$\text{Mean} = (1,56922 + 1,33572 + 1,33252) / 3$$

$$\text{Mean} = 4,13746 / 3$$

$$\text{Mean} = 3,34912 \text{ mg/L}$$

Langkah 4. Konversi ke Kadar Pati Terhidrolisis ($\times 0,9$)

$$\text{Kadar Pati} = \text{Mean Kadar Glukosa} \times 0,9$$

$$\text{Kadar Pati} = 3,34912 \times 0,9$$

$$\text{Kadar Pati} = 3,01421 \text{ mg/L}$$

Lampiran 16. Data Absorbansi, Kadar Glukosa, Kadar Pati, dan AUC Roti Putih
(Referensi Sampel: Roti Gandum Hitam)

Waktu (menit)	Absorbansi	Kadar Glukosa	Kadar Pati	AUC
0	1,8678	2,192923153	1,973630837	42,7722934
30	2,697	3,022123153	2,719910837	44,9104234
60	2,8001	3,125223153	2,812700837	53,8983634
90	3,459	3,784123153	3,405710837	60,2963734
120	3,889	4,214123153	3,792710837	201,8774536

Lampiran 17. Data Nilai AUC, HI (%), dan eGI

Sampel	Ulangan	AUC	HI (%)	eGI	Rata-rata eGI
Kontrol	U1	117,86	58,384	71,76	69,33
	U2	107,68	53,342	68,99	
	U3	101,85	50,455	67,41	
L1Y3	U1	79,87	39,565	61,43	59,67
	U2	77,38	38,333	60,75	
	U3	70,14	34,742	58,78	
L3Y3	U1	62,05	30,74	56,58	55,33
	U2	59,05	29,25	55,76	
	U3	57,69	20,28	55,4R3	

Lampiran 18. Cara Perhitungan AUC, HI, dan eGI

- **Contoh Perhitungan AUC : Perlakuan L3Y3 Ulangan 1 (U1)**

Data kadar pati terhidrolisis L3Y3 U1 (Lampiran 13):

Waktu (menit)	Kadar Pati (mg/L)
0	0.3106
30	0.3052
60	1.1102
90	1.2232
120	1.3020

- **Perhitungan AUC tiap interval:**

Interval 1 (menit 0 → 30) :

$$AUC_1 = [(0.3106 + 0.3052) / 2] \times (30 - 0)$$

$$AUC_1 = [0.6158 / 2] \times 30$$

$$AUC_1 = 0.3079 \times 30 = 9.2372 \text{ mg/L}$$

Interval 2 (menit 30 → 60) :

$$AUC_2 = [(0.3052 + 1.1102) / 2] \times (60 - 30)$$

$$AUC_2 = [1.4154 / 2] \times 30$$

$$AUC_2 = 0.7077 \times 30 = 21.2306 \text{ mg/L}$$

Interval 3 (menit 60 → 90) :

$$AUC_3 = [(1.1102 + 1.2232) / 2] \times (90 - 60)$$

$$AUC_3 = [2.3334 / 2] \times 30$$

$$AUC_3 = 1.1667 \times 30 = 35.0006 \text{ mg/L}$$

Interval 4 (menit 90 → 120) :

$$AUC_4 = [(1.2232 + 1.3020) / 2] \times (120 - 90)$$

$$AUC_4 = [2.5253 / 2] \times 30$$

$$AUC_4 = 1.2626 \times 30 = 37.8788 \text{ mg/L}$$

$$\text{Total AUC L3Y3 U1} = AUC_1 + AUC_2 + AUC_3 + AUC_4$$

$$= 9.2372 + 21.2306 + 35.0006 + 37.8788$$

$$= 103.3474 \text{ mg/L} \cdot \text{menit} \approx 62,05 \text{ mg/L}$$

- **Contoh Perhitungan HI :**

L3Y3 U1 : AUC = 62,05

$$HI = (62,05 / 201,877) \times 100$$

$$HI = 30.737 \%$$

$$= 30,74 \%$$

- **Contoh Perhitungan eGI :**

L3Y3 U1 : HI = 30,74

$$eGI = 39,71 + (0,549 \times 30,74)$$

$$eGI = 39,71 + 16.8763$$

$$eGI = 56.586$$

$$= 56,58$$

Lampiran 19. Hasil Uji One Way Anova Nilai eGI

ANOVA

Indeks Glikemik

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	308.222	2	154.111	51.370	.000
Within Groups	18.000	6	3.000		
Total	326.222	8			

Lampiran 20. Hasil Uji Normalitas (*Kolmogorov-Smirnov*)

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		Indeks Glikemik
N		9
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	61.4444
	Std. Deviation	6.38575
Most Extreme Differences	Absolute	.194
	Positive	.194
	Negative	-.156
Test Statistic		.194
Asymp. Sig. (2-tailed)		.200 ^{c,d}

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

c. Lilliefors Significance Correction.

d. This is a lower bound of the true significance.

Lampiran 21. Hasil Uji Homogenitas (*Levene's Test*)

Test of Homogeneity of Variances

Indeks Glikemik

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.895	2	6	.230

Lampiran 22. Statistik Deskriptif

Descriptives

Indeks Glikemik

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Kontrol	3	69.3333	2.51661	1.45297	63.0817	75.5849	67.00	72.00
L1Y3	3	59.6667	1.52753	.88192	55.8721	63.4612	58.00	61.00
IL3Y3	3	55.3333	.57735	.33333	53.8991	56.7676	55.00	56.00
Total	9	61.4444	6.38575	2.12858	56.5359	66.3530	55.00	72.00

Lampiran 23. Hasil Uji Lanjut DMRT (Duncan)

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

Indeks Glikemik

Duncan^a

Perlakuan	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
IL3Y3	3	55.3333		
L1Y3	3		59.6667	
Kontrol	3			69.3333
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Lampiran 24. Bukti Konsultasi Pembimbing Biologi dan Agama

KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
Jalan Gajayana Nomor 50, Telepon (0341) 551354, Fax (0341) 572533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

AS MAHASISWA

220602110127
AISATUNNADIVA KOMALA MURSYID
SAINS DAN TEKNOLOGI
BIOLOGI

Pembimbing 1 : Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si
Pembimbing 2 : Prof. Dr. HAHMAD BARIZI, M.A
Skrripsi/Tesis/Disertasi : Pengaruh kombinasi bakteri asam laktat dan khamir endofit terhadap nilai gizi dan indeks glikemik roti gandum hitam

TAS BIMBINGAN

Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
10 September 2025	Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si	Konsultasi Judul Skripsi	Ganjil 2025/2026	
8 September 2025	Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si	Presentasi Jurnal Acuan	Ganjil 2025/2026	
17 Oktober 2025	Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si	Presentasi Proposal Skripsi	Ganjil 2025/2026	
14 November 2025	Prof. Dr. HAHMAD BARIZI, M.A	Bimbingan integrasi BAB 1 dan 2	Ganjil 2025/2026	Belum Dikoreksi
17 November 2025	Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si	Revisi Proposal Skripsi	Ganjil 2025/2026	
12 November 2025	Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si	ACC Proposal Skripsi BAB 123	Ganjil 2025/2026	
12 November 2025	Prof. Dr. HAHMAD BARIZI, M.A	Bimbingan Integrasi Proposal Skripsi	Ganjil 2025/2026	Belum Dikoreksi
25 Mei 2026	Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si	Konsultasi BAB 4 hasil dan pembahasan	Genap 2026/2027	
02 Juni 2026	Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si	Konsultasi BAB 4 & 5	Genap 2025/2026	
02 Juni 2026	Prof. Dr. HAHMAD BARIZI, M.A	ACC Integrasi Sains dan Islam Skripsi	Genap 2025/2026	Belum Dikoreksi
02 Juni 2026	Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si	ACC Naskah Skripsi	Genap 2025/2026	

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2 : Prof. Dr. HAHMAD BARIZI, M.A

Malang, _____
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Dr. Hj. ULFAH UTAMI, M.Si

CS Dipindai dengan aplikasi CamScanner

Lampiran 25. Bukti Cek Plagiarisme



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
PROGRAM STUDI BIOLOGI
 Jl. Gajayana No. 50 Malang 65144 Telp./ Faks. (0341) 558933
 Website: <http://biologi.uin-malang.ac.id> Email: biologi@uin-malang.ac.id

Form Checklist Plagiasi

Nama : Aisatunnadiya Komala Mursyid
NIM : 220602110127
Judul : Pengaruh Kombinasi *Lactiplantibacillus plantarum* dan *Saccharomyces cerevisiae* Terhadap Nilai *estimated Glycemic Index* (eGI) Secara *In Vitro* dan Kualitas Roti Gandum Hitam

No	Tim Check plagiasi	Skor Plagiasi	TTD
1	Azizatur Rohmah, M.Sc	22%	
2	Berry Fakhry Hanifa, M.Sc		
3	Bayu Agung Prahardika, M.Si		
4	Tyas Nyonita Punjungsari, M.Sc		
5	Maharani Retna Duhita, M.Sc., PhD.Med.Sc		

Mengetahui,
 Ketua Program Studi Biologi



Prof. Dr. Retno Susilowati, M.Si
 NIP. 19671113 199402 2 001


 Dipindai dengan CamScanner