

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketahanan pangan merupakan salah satu isu strategis global yang semakin kompleks dan mendesak seiring dengan peningkatan pertumbuhan populasi global yang pesat, perubahan iklim yang tidak menentu, dinamika ekonomi yang kompleks, dan keterbatasan sumber daya alam. Secara global, *Food and Agriculture Organization* (FAO) (2021) memperkirakan bahwa kebutuhan pangan global akan meningkat hingga 70% pada tahun 2050, seiring dengan peningkatan jumlah penduduk dunia yang diperkirakan mencapai 9,7 miliar jiwa. Peningkatan jumlah penduduk tersebut yang terus berlangsung menuntut ketersediaan pangan yang cukup, bergizi, berkelanjutan, dan terjangkau (Langyan, *et al.*, 2022). Di Indonesia, ketahanan pangan didefinisikan dalam UU No. 17 Tahun 2015 bahwa ketahanan pangan sebagai kondisi terpenuhinya kebutuhan pangan dari tingkat nasional hingga perorangan, mencakup ketersediaan pangan yang cukup, baik dalam jumlah dan kualitas yang memadai, aman, beragam, memenuhi kecukupan gizi, merata, dan dapat diakses dengan harga yang terjangkau, serta tidak bertentangan dengan agama, keyakinan, dan budaya masyarakat, untuk mewujudkan status gizi yang baik agar dapat hidup sehat, aktif, dan produktif secara berkelanjutan (Indonesia, 2015).

Menurut FAO, ketahanan pangan tercapai ketika setiap orang, setiap saat, memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi yang cukup untuk mendapatkan pangan yang cukup, aman, dan bergizi guna memenuhi kebutuhan pangan dan preferensi pangan untuk hidup dan sehat dalam sehari-hari (FAO, 2025). Hal tersebut didasarkan pada empat pilar utama ketahanan pangan, yaitu ketersediaan (*availability*) pasokan pangan yang memadai, akses (*access*) dalam kemampuan individu untuk memperoleh pangan, pemanfaatan (*utilization*) dalam kemampuan tubuh untuk memanfaatkan kandungan gizi dari pangan, dan stabilitas (*stability*) dalam kemampuan untuk mempertahankan akses pangan dari waktu ke waktu (Ibnu, 2025). Definisi tersebut menegaskan bahwa aspek kualitas gizi, khususnya pemenuhan zat gizi makro dan mikro, merupakan bagian integral dari ketahanan pangan. Namun, peningkatan kebutuhan dan permintaan pangan tersebut tidak diimbangi dengan ketersediaan lahan produktif yang memadai. Perluasan pembangunan infrastruktur, urbanisasi, serta alih fungsi lahan pertanian dan peternakan terus berlangsung dan menyebabkan penyusutan lahan pangan produktif secara signifikan, sehingga berpotensi menurunkan kapasitas produksi pangan dan meningkatkan kerentanan terhadap krisis pangan di masa depan (Armaya, 2025).

Tantangan ketahanan pangan saat ini tidak hanya terletak pada ketersediaan pangan secara kuantitatif, melainkan pada kualitas gizi,

khususnya pemenuhan kebutuhan protein. Protein merupakan zat gizi makro esensial yang berperan penting dalam pertumbuhan dan perbaikan jaringan tubuh, pembentukan enzim dan hormon, serta pemeliharaan sistem imun. FAO (2021) memperkirakan bahwa permintaan protein global akan meningkat hingga 70% seiring dengan pertumbuhan populasi. Akan tetapi, hingga saat ini beban malnutrisi akibat Kekurangan Energi Protein (KEP) masih menjadi permasalahan gizi utama, terutama di negara berkembang (FAO, 2021). Secara global, sekitar 45% rumah tangga di negara berkembang mengalami defisit energi dan protein di bawah 70–80% tingkat kecukupan, yang sebagian besar disebabkan oleh kemiskinan struktural dan kerawanan pangan kronis. Pola konsumsi masyarakat berpenghasilan rendah masih didominasi oleh pangan sumber karbohidrat seperti beras, jagung, dan singkong, yang relatif rendah kandungan protein dan miskin asam amino esensial, terutama lisin. Kondisi ini menyebabkan kualitas asupan protein menjadi tidak seimbang dan meningkatkan risiko KEP, terutama pada kelompok rentan seperti balita, ibu hamil, dan lansia (Andita *et al.*, 2025).

Di Indonesia, permasalahan KEP masih menjadi indikator penting kerentanan ketahanan pangan nasional. Data menunjukkan bahwa sekitar 19,9 juta penduduk masih mengalami kekurangan gizi, dengan 13,6 juta di antaranya berada dalam kondisi rawan pangan sedang hingga kronis (Ibnu, 2025). Rata-rata konsumsi protein harian penduduk Indonesia berada pada kisaran 61,7 gram per kapita per hari, dengan kontribusi protein nabati sebesar 31,03 gram dan protein hewani sebesar 17,42 gram. Dominasi protein nabati tersebut belum sepenuhnya mencerminkan kualitas protein yang optimal karena sebagian besar berasal dari sereal dengan keterbatasan asam amino esensial. Dampak jangka panjang dari kekurangan protein tercermin pada prevalensi stunting nasional yang masih berada pada kisaran 21–22%, yang menunjukkan terjadinya defisit gizi kronis sejak usia dini dan berpotensi menurunkan kualitas sumber daya manusia di masa depan. Di tingkat regional, Provinsi Sulawesi Selatan menunjukkan kondisi yang lebih mengkhawatirkan, dengan prevalensi KEP mencapai 26,4% dan sekitar 45,54% rumah tangga mengalami defisit energi. Kondisi ini mengindikasikan adanya kesenjangan antara ketersediaan pangan secara makro dan keterjangkauan akses terhadap sumber protein berkualitas secara mikro, yang semakin diperparah oleh tekanan ekonomi dan dampak pasca pandemi (Andita *et al.*, 2025).

Selama ini, pemenuhan protein banyak bergantung pada sumber protein hewani seperti daging, susu, dan telur, yang memiliki kualitas biologis tinggi. Namun, ketergantungan yang berlebihan terhadap protein hewani menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain tingginya emisi gas rumah kaca, degradasi lingkungan, fluktuasi harga pakan, serta peningkatan risiko penyakit degeneratif akibat konsumsi berlebihan (Handayani, 2025). Kondisi tersebut mendorong perlunya pengembangan sumber protein nabati alternatif yang lebih berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan. Protein nabati

memiliki beberapa keunggulan, antara lain jejak lingkungan yang lebih rendah, ketersediaan yang lebih luas, harga yang relatif terjangkau, serta kandungan serat dan senyawa bioaktif yang mendukung kesehatan. Oleh karena itu, pengembangan pangan fungsional berbasis protein nabati menjadi strategi penting dalam upaya diversifikasi pangan dan penguatan ketahanan pangan nasional. Pangan fungsional nabati tidak hanya berfungsi sebagai sumber protein, tetapi juga mengandung senyawa bioaktif seperti polifenol, vitamin, dan antioksidan yang memberikan manfaat kesehatan tambahan (Meza *et al.*, 2024).

Indonesia, sebagai negara agraris dengan padi sebagai komoditas utama. Berdasarkan Badan Pusat Statistik (BPS) (2024), produksi padi di Indonesia pada tahun 2024 sebesar 53,14 juta ton gabah kering giling, sedangkan di provinsi Sulawesi Selatan sebesar mencapai sekitar 4,8 juta ton gabah kering giling. Dari proses penggilingan padi tersebut dihasilkan bekatul, yaitu lapisan luar dari beras berwarna cokelat yang terlepas saat proses penggilingan kedua dari gabah dengan proporsi mencapai 8–12% dari berat gabah (Manzoor *et al.*, 2023). Bekatul terdiri atas beberapa lapisan, yaitu *pericarp*, *seed coat*, *nucleus*, dan *aleurone* (Hidayah *et al.*, 2024). Bekatul yang merupakan produk samping yang dihasilkan dari proses penggilingan gabah dan penyosohan beras, dimana komponen ini tidak diinginkan tercampur ke dalam beras dikarenakan dapat menurunkan daya simpannya akibat sifat mudah tengik, serta memberi warna kecokelatan yang dianggap mengurangi kualitas tampilan beras. Sehingga, selama ini bekatul lebih sering dianggap sebagai hasil samping atau limbah industri penggilingan beras yang tidak termanfaatkan, dan mayoritas hanya sebagai pakan ternak murah (Defrilia *et al.*, 2025).

Padahal secara komposisi gizi, bekatul mengandung berbagai zat gizi penting yang bermanfaat bagi kesehatan dan dapat berperan dalam bahan baku industri pangan. Kandungan protein bekatul berkisar antara 12-15% dengan profil asam amino esensial yang cukup lengkap, termasuk lisin yang biasanya terbatas pada sereal lain. Bekatul juga kaya akan karbohidrat, asam lemak tak jenuh, vitamin (B1, B2, B3, B5, B6, B12, B15), mineral, serta serat pangan (Ghasemzadeh *et al.*, 2018). Kandungan seratnya cukup tinggi, yaitu sekitar 25,3 gram/100 gram, terdiri atas selulosa, hemiselulosa, dan pentosan yang sebagian besar tidak larut air, sehingga berpotensi memenuhi kebutuhan serat harian (Hidayah *et al.*, 2024). Lebih dari sekadar sumber protein, bekatul juga memiliki keunggulan komparatif pada kandungan senyawa bioaktif fitokimia yang berfungsi sebagai antioksidan alami. Bekatul kaya akan komponen non-pati seperti γ -oryzanol, tokoferol (vitamin E), tokotrienol, dan asam ferulat. Senyawa γ -oryzanol memiliki aktivitas antioksidan yang kuat dalam menangkal radikal bebas, mencegah oksidasi kolesterol *low density lipoprotein* (LDL), dan menurunkan risiko penyakit degeneratif seperti aterosklerosis dan kanker (Tan *et al.*, 2023). Selain itu,

bekatul juga kaya lemak tak jenuh sehingga aman dikonsumsi oleh penderita kolesterol dan penyakit jantung (Manzoor *et al.*, 2023).

Dengan kandungan gizi dan bioaktivitasnya tersebut, bekatul berpotensi besar sebagai bahan pangan fungsional yang mendukung kesehatan, terutama dalam pencegahan penyakit degeneratif seperti kanker, jantung koroner, obesitas, diabetes, dan gangguan pencernaan (Tan *et al.*, 2023). Sifat fungsional bekatul seperti daya larut, daya serap air, dan kemampuan menyerap lemak juga menjadikannya sesuai untuk dijadikan bahan substitusi dalam produk pangan, misalnya menggantikan sebagian tepung terigu atau tepung beras (Aris & Pangesthi, 2019). Menurut Kurniawati (2014 dalam Hidayah, 2024), substitusi tepung bekatul dalam produk pangan dapat meningkatkan kadar serat dan memperkaya nilai gizi produk, meskipun kadar lemaknya cenderung menurun secara nyata. Fakta ini menunjukkan bahwa bekatul memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai bahan baku pangan bergizi dan bernilai fungsional tinggi, khususnya sumber protein nabati fungsional yang mendukung pemenuhan gizi dan pencegahan penyakit degeneratif.

Meskipun bekatul memiliki kandungan gizi yang tinggi dan potensi pemanfaatannya sangat besar, namun mutu dan komposisi kimia bekatul tidak selalu tetap, bisa berubah-ubah tergantung pada banyak faktor, baik dari segi budidaya tanaman padi maupun cara pengolahannya (Liu *et al.*, 2019). Salah satu faktor penting adalah jenis varietas padi yang digunakan, lingkungan tempat tumbuhnya padi seperti jenis dan kondisi tanah, ketersediaan air, dan pemupukan yang juga sangat berpengaruh terhadap kandungan protein dan mineral yang nantinya terbawa ke dalam bekatul. Di sisi lain, proses penggilingan padi (*milling*) juga sangat menentukan mutu bekatul. Tingkat penyosohan (seberapa banyak kulit ari padi yang dihilangkan) dan jenis mesin penggiling yang digunakan akan berpengaruh pada jumlah bekatul yang dihasilkan, serta tekstur dan kadar serat kasarnya (Kim *et al.*, 2022). Hal ini membuat kualitas bekatul seringkali berbeda-beda antar tempat. Terlepas dari keragaman faktor varietas, kondisi tanam, maupun proses penggilingan tersebut yang dapat mempengaruhi komposisi awal, potensi besar bekatul tersebut memiliki tantangan fundamental dalam pemanfaatan bekatul sebagai bahan pangan (*food grade*) adalah belum dimanfaatkannya secara optimal karena adanya kendala utama berupa instabilitas pasca panen yang sangat rendah (Sullman *et al.*, 2023).

Setelah proses penggilingan padi, bekatul akan segera mengalami kerusakan oksidatif dan hidrolitik yang cepat. Masalah ini dipicu oleh tingginya kandungan lemak dalam bekatul yang bertemu dengan aktivitas enzim endogen, yaitu enzim lipase dan lipooksigenase. Saat struktur sel bekatul rusak akibat penggilingan, enzim lipase akan bekerja sangat cepat mengkatalisis reaksi hidrolisis pada trigliserida menjadi asam lemak bebas (*free fatty acids*) dan gliserol (Komalasari *et al.*, 2025). Peningkatan kadar asam lemak bebas ini menjadi indikator utama penurunan mutu, dimana hanya

dalam waktu singkat yakni kurang dari 24 jam pada suhu ruang, kadar asam lemak bebas dapat melonjak tajam, menyebabkan mudahnya teroksidasi dan timbulnya aroma tengik (*rancidity*) dan rasa pahit yang tajam yang tidak dapat diterima oleh indera pengecap manusia, sehingga menurunkan mutu organoleptik produk (Gionte *et al.*, 2022).

Di sisi lain, enzim lipooksigenase memperparah kerusakan dengan mengkatalisis oksidasi asam lemak tak jenuh ganda (PUFA), menghasilkan senyawa hidroperoksida yang tidak stabil yang kemudian terurai menjadi aldehid dan keton yang menyebabkan aroma tengik. Tidak hanya memperburuk aroma, reaksi oksidasi ini juga menyerang dan mendegradasi komponen senyawa antioksidan (seperti tokoferol dan oryzanol) yang seharusnya menjadi nilai jual utama bekatul (Herisetianis & Seftiono, 2023). Kondisi ini menyebabkan masa simpan bekatul sangat terbatas dan memiliki kualitas organoleptik yang buruk (rasa pahit, aroma tidak sedap, dan tekstur kasar) sehingga sulit diterima oleh konsumen dan industri pangan. Oleh karena itu, bekatul yang tidak segera distabilkan akan kehilangan nilai fungsionalnya dalam waktu singkat (Komalasari *et al.*, 2025).

Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa proses stabilisasi pasca panen belum optimal. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan proses stabilisasi pasca panen yang menjadi tahapan kritis dan mutlak diperlukan segera untuk menonaktifkan enzim-enzim perusak tersebut setelah penggilingan untuk mempertahankan kualitas dan nilai gizi bekatul. Stabilisasi merupakan proses menonaktifkan enzim (inaktivasi enzim) penyebab ketengikan secara permanen tanpa merusak komponen gizi di dalamnya. Tantangan terbesar dalam proses stabilisasi adalah menemukan metode yang mampu menghentikan aktivitas enzim lipase dan lipooksigenase secara efektif, namun tetap mempertahankan kadar antioksidan dan mutu organoleptik (warna, aroma, rasa, dan tekstur) yang dapat diterima konsumen (Irakli *et al.*, 2021). Terdapat beberapa metode stabilisasi yang umum digunakan antara lain oven (*dry heat*), microwave, *steaming* (pengukusan), dan *roasting* (sangrai). Namun, setiap metode memiliki karakteristik yang berbeda dalam mempengaruhi mutu organoleptik, aktivitas antioksidan, serta struktur protein. Perlakuan panas yang tidak tepat berisiko menyebabkan denaturasi protein berlebihan, penurunan ketersediaan asam amino esensial, serta kerusakan senyawa antioksidan yang sensitif terhadap panas (Tuncel, 2023).

Metode oven (*dry heat*) menggunakan panas kering yang efektif menurunkan kadar air untuk mencegah pertumbuhan mikroba dan menonaktifkan enzim, namun pemanasan yang lama pada suhu tinggi berisiko menyebabkan merusak struktur protein (denaturasi protein) yang berlebihan dan komponen antioksidan yang sensitif terhadap panas, serta menyebabkan reaksi *maillard* (pencokelatan non-enzimatis) yang berlebihan antara asam amino dan gula pereduksi. Reaksi ini dapat mengubah warna dan rasa, serta merusak ketersediaan asam amino esensial (Dubey, 2019). Adapun metode

steaming (pengukusan) menggunakan uap panas yang dinilai lebih baik dalam mempertahankan tekstur, warna dan aroma, namun paparan uap air yang berlebih dapat memicu penggumpalan tepung dan memerlukan proses pengeringan lanjutan yang memakan energi dan waktu pemrosesan lebih lama (Yu *et al.*, 2019).

Metode *roasting* (sangrai) merupakan teknik pengolahan bahan pangan dengan cara memanaskan bahan menggunakan suhu tinggi tanpa atau dengan sedikit minyak untuk menghasilkan perubahan warna, aroma, rasa, dan tekstur yang khas. Proses sangrai banyak digunakan pada kopi, kakao, kacang-kacangan, dan rempah karena mampu meningkatkan cita rasa melalui reaksi *maillard* dan karamelisasi selama pemanasan (Yang *et al.*, 2023). Prinsip kerja metode sangrai dilakukan dengan mentransfer panas secara langsung atau tidak langsung ke bahan sehingga kadar air menurun dan senyawa volatil pembentuk aroma meningkat (Faisal *et al.*, 2024). Berbeda dengan metode konvensional yang memanaskan dari luar ke dalam, metode microwave merupakan pemanasan menggunakan gelombang elektromagnetik sebagai pilihan yang semakin populer karena mampu memanaskan secara cepat dan merata (*internal heating*), dapat menonaktifkan enzim dalam waktu singkat tanpa merusak banyak komponen gizi, sehingga dapat meminimalisir kerusakan termal pada struktur antioksidan dan protein (Yu *et al.*, 2019).

Beberapa penelitian terdahulu telah melaporkan keberhasilan metode stabilisasi dalam memperpanjang umur simpan bekatul. Gunawan *et al.* (2021) menunjukkan bahwa perlakuan microwave selama tiga menit mampu menurunkan aktivitas lipase hingga 90%. Penelitian Rahman *et al.* (2022) juga menunjukkan bahwa metode oven pada suhu 120°C selama 20 menit dapat memperpanjang masa simpan bekatul hingga dua bulan tanpa perubahan warna signifikan. Namun, hasil-hasil tersebut masih menunjukkan keragaman dan inkonsistensi karena sebagian besar penelitian tersebut bersifat parsial, hanya berfokus pada satu atau dua metode stabilisasi, atau hanya menilai aspek kimia tertentu tanpa mengaitkannya secara komprehensif dengan mutu organoleptik dan retensi aktivitas antioksidan. Belum terdapat penelitian yang membandingkan keempat metode (oven, microwave, *steaming*, dan *roasting*) secara simultan dengan fokus spesifik pada korelasi antara mutu organoleptik (rasa, aroma, warna, dan tekstur) dan aktivitas antioksidan bekatul secara komprehensif.

Urgensi penelitian ini semakin kuat seiring meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap pangan nabati berkelanjutan dan kebutuhan untuk mengembangkan produk berbasis sumber daya lokal. Dengan proses stabilisasi yang tepat, bekatul dapat diolah menjadi tepung nabati bergizi, ekonomis, dan ramah lingkungan yang mendukung program diversifikasi pangan nasional serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat lokal. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk mengevaluasi dan membandingkan pengaruh metode oven, microwave, *steaming*, dan *roasting*

terhadap mutu organoleptik dan aktivitas antioksidan tepung bekatul, guna menentukan metode stabilisasi paling efektif dalam mempertahankan kualitas gizi dan penerimaan konsumen. Dengan ditemukannya metode stabilisasi yang optimal dari hasil penelitian ini, diharapkan bekatul dapat bertransformasi dari limbah bernilai rendah menjadi bahan baku pangan fungsional yang mendukung program diversifikasi pangan nasional, berkontribusi dalam mendukung ketahanan pangan nasional, pengurangan limbah pertanian, membantu pengentasan masalah kekurangan protein, serta memiliki relevansi sosial-ekonomi, karena dapat mendorong pemanfaatan hasil samping pertanian bernilai rendah menjadi produk pangan fungsional bernilai tinggi, meningkatkan nilai ekonomi rantai pasok padi di Indonesia, dan pengembangan inovasi pangan berbasis sumber daya lokal yang sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs).

1.2 Teori

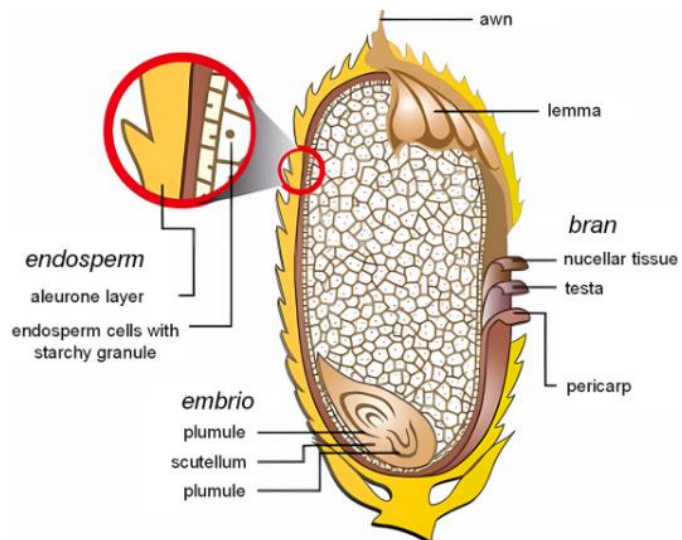
1.2.1 Tinjauan Umum Bekatul

1. Definisi bekatul

Biji padi (*Oryza Sativa L.*) merupakan jenis kariopsis yang tersusun atas beberapa lapisan morfologi yang berbeda. Secara umum, struktur biji padi terbagi menjadi tiga bagian utama, yaitu lapisan pelindung luar, endosperma yang kaya pati, dan embrio. Bagian terluar biji padi dilindungi oleh sekam yang tidak dapat dimakan, terdiri atas lemma dan palea, yang berfungsi melindungi biji selama masa pertumbuhan dan pematangan. Setelah sekam dihilangkan, bagian biji yang dapat dimakan terdiri atas kulit buah (*perikarp*), kulit biji (*testa*), dan jaringan nuselus, yang secara kolektif disebut sebagai bekatul (*bran*) (Li *et al.*, 2022).

Bekatul (*bran*) merupakan lapisan terluar dari kulit beras yang terpisah selama proses penggilingan gabah menjadi beras. Penggilingan beras dilakukan dalam dua tahap, hasil penggilingan tahap pertama menghasilkan sekam, dan tahap kedua dilakukan penyosohan untuk menghasilkan beras putih dan bekatul sebagai produk sampingnya. Bekatul merupakan lapisan berwarna cokelat dari kulit padi yang terdiri dari beberapa lapisan, yaitu *aleurone*, *pericarp*, *seed coat*, *nucleus*, *testa*, dan embrio (*germ*). Lapisan-lapisan ini terlepas dari endosperma selama proses penyosohan atau *milling*, sehingga menghasilkan fraksi bekatul yang kaya zat gizi. Kandungan gizi yang tinggi pada bagian aleurone dan germ membuat bekatul memiliki nilai fungsional penting dalam pangan. Secara umum, proses penggilingan gabah dapat menghasilkan beras sekitar 60 – 65%, dan proporsi bekatul yang diperoleh sekitar 8 – 12% dari total berat gabah saat proses *milling* (Hidayah, *et al.*, 2024).

Di bawah lapisan bekatul terdapat endosperma bertepung, yang menyusun sekitar 90% dari total berat biji dan berfungsi sebagai cadangan energi utama. Endosperma terbagi menjadi dua bagian, yaitu lapisan sub aleuron yang kaya protein dan endosperma pati bagian tengah yang tersusun atas granula pati kompleks yang terperangkap dalam matriks protein. Embrio terletak pada bagian dasar biji dan mengandung jaringan calon tanaman, seperti plumula dan radikula, serta skutelum, yaitu organ khusus yang berperan sebagai penghubung antara embrio dan endosperma selama proses perkecambahan. Struktur morfologi biji padi dapat berbeda antar varietas, yang memengaruhi ukuran biji (panjang, sedang, atau pendek), bentuk, serta warna lapisan bekatul (Zhou *et al.*, 2021).



Gambar 1.1 Struktur morfologi bekatul

Sumber: Shakri et al., 2021

2. Kandungan gizi bekatul bekatul

Bekatul memiliki komposisi gizi yang kaya dan seimbang, menjadikannya salah satu hasil sampingan padi yang bernilai tinggi dalam pangan fungsional. Kandungan utama bekatul meliputi karbohidrat (35–52%), protein (12–18%), lemak (15–22%), serat kasar (6–12%), serta mineral seperti magnesium, fosfor, dan kalium (Canizares *et al.*, 2024). Selain itu, bekatul mengandung berbagai senyawa bioaktif seperti γ -oryzanol, tokoferol, tokotrienol, asam ferulat, dan fitosterol yang berfungsi sebagai antioksidan alami dan antikolesterol (Spaggiari *et al.*, 2021).

Lapisan pada bekatul yang terdiri atas pericarp, testa, aleuron, dan embrio (*germ*) yang kaya akan komponen bioaktif seperti protein, serat pangan, vitamin B kompleks, tokoferol, dan asam ferulat (Spaggiari *et al.*, 2021). Dalam proses *milling*, bekatul diperoleh sebagai hasil sampingan dari tahap penyosohan dan memiliki proporsi sekitar 8–12% dari total berat gabah. (Nath *et al.*, 2025). Lapisan perikarp dan testa berfungsi sebagai pelindung biji dan mengandung serat pangan serta senyawa fenolik. Lapisan aleuron merupakan bagian yang paling kaya nutrisi karena mengandung protein, mineral, vitamin B kompleks, serta enzim-enzim metabolik. Sementara itu, embrio (*germ*) merupakan pusat pertumbuhan biji yang memiliki kandungan lipid, protein berkualitas tinggi, serta vitamin larut lemak seperti tokoferol dan tokotrienol (Rashid *et al.*, 2023).

Protein bekatul sebagian besar terakumulasi pada lapisan aleuron, sedangkan fraksi lemak dan vitamin E terutama terdapat pada embrio. Selain itu, keberadaan serat pangan dan senyawa fenolik pada perikarp dan testa turut memperkaya nilai fungsional bekatul (Spaggiari *et al.*, 2021). Kombinasi struktur anatomi dan komposisi kimia tersebut menjadikan bekatul sebagai bagian gabah dengan kepadatan gizi dan potensi fungsional tertinggi, meskipun jumlahnya relatif kecil dalam proses penggilingan padi. Secara kimiawi, bekatul mengandung karbohidrat sekitar 34–52%, protein 11–17%, lemak 15–22%, serta mineral seperti magnesium, fosfor, dan kalium. Selain itu, terdapat senyawa fitokimia seperti γ -oryzanol, tokoferol, tokotrienol, dan asam ferulat yang berfungsi sebagai antioksidan alami (Rashid *et al.*, 2023). Namun, komponen lemaknya yang tinggi membuat bekatul mudah mengalami ketengikan akibat aktivitas enzim lipase, sehingga diperlukan proses stabilisasi untuk memperpanjang masa simpannya (Tufail *et al.*, 2022).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa stabilisasi termal seperti pemanasan kering dan microwave dapat mempertahankan kadar fenolik dan aktivitas antioksidan hingga 90% dari kondisi awal (Musika *et al.*, 2025). Kandungan serat larut dan tidak larut pada bekatul juga berperan dalam menurunkan risiko penyakit kardiovaskular dan memperbaiki metabolisme glukosa (Evangelista & Schönlechner, 2025).

3. Pemanfaatan bekatul

Tepung bekatul adalah bentuk olahan dari bekatul yang telah melalui proses pengeringan, stabilisasi, dan penghalusan menjadi partikel halus. Proses ini bertujuan untuk menonaktifkan enzim lipase dan lipooksigenase yang menyebabkan ketengikan, serta menjaga stabilitas kandungan nutrisi (Tufail *et al.*, 2022).

Menurut Das *et al.* (2025), tepung bekatul yang distabilisasi memiliki aktivitas antioksidan 1,3 kali lebih tinggi dibandingkan sebelum stabilisasi, berkat meningkatnya ketersediaan fenolik bebas dan asam ferulat. Selain itu, tepung bekatul berpotensi digunakan dalam fortifikasi produk roti, kue, biskuit, dan minuman fungsional karena meningkatkan kandungan serat, protein, dan antioksidan tanpa menurunkan kualitas sensorik (Espinales *et al.*, 2022). Penelitian lain oleh Liu *et al.* (2025) menunjukkan bahwa mikroenkapsulasi tepung bekatul mampu memperpanjang masa simpan produk bayi berbasis sereal dan mempertahankan kualitas fisik serta nilai gizinya. Oleh karena itu, tepung bekatul menjadi salah satu kandidat bahan pangan fungsional masa depan yang ramah lingkungan dan bernilai ekonomi tinggi.

Tabel 1.1 Tabel sintesis bekatul

No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
1.	Najamuddin, Gorji, and Fitzgerald, (2021) https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104077	“Genotypic Variability in the Composition of Soluble Protein from Rice Bran – Opportunities for Nutrition” <i>Journal of Food Composition and Analysis</i>	Desain eksperimental Mengevaluasi pengaruh varietas padi dan durasi penggilingan (15-90 detik) terhadap perolehan protein. Metode Analisis: Fraksinasi protein Osborne (Albumin, Globulin, Glutelin, Prolamin), SDS-PAGE, dan UHPLC-MS untuk profil asam amino	8 varietas padi (MSC18, MKY16n, YUA16n, Viet4, IR64, Doongara, Lemont, Bengal) yang ditanam di Mackay, Queensland. Bekatul dikumpulkan dari 6 titik waktu penggilingan berbeda untuk setiap varietas	a. Terdapat variabilitas genotipik yang signifikan; varietas MKY16n memiliki kandungan protein total dan protein larut air tertinggi . b. Fraksi albumin (larut air) adalah protein paling dominan dan paling tinggi konsentrasinya pada penggilingan awal (15-30 detik) . c. Semakin lama waktu penggilingan, kandungan pati meningkat dan proporsi protein menurun, sehingga waktu penggilingan pendek optimal untuk ekstraksi protein
2.	Spaggiari, M., Dall'Asta, C., Galaverna, G. (2021) https://doi.org/10.3390/foods10010085	“Rice Bran By-Product: From Valorization Strategies To Nutritional Perspectives” <i>Foods (MDPI)</i>	Review sistematis menggunakan pendekatan literatur global mengenai kandungan dan pemanfaatan bekatul.	Data sekunder dari 75 studi internasional (2010–2020).	Bekatul mengandung protein, serat, asam ferulat, dan γ -oryzanol yang potensial sebagai pangan fungsional.
3.	Tan, Norhaizan and Chan, (2023)	“Rice Bran: From Waste to Nutritious Food Ingredients”	<i>Narrative Review</i> (Tinjauan Pustaka)	Studi literatur global mengenai komponen bioaktif bekatul (gamma-	a. Bekatul efektif melawan penyakit metabolik (kanker, vaskular, diabetes tipe 2) berkat kandungan bioaktifnya

	https://doi.org/10.3390/nu15112503	<i>Nutrients</i>	Mengkaji literatur terkini mengenai transformasi bekatul dari limbah menjadi bahan pangan bernilai tinggi. Metode Analisis: Sintesis data sekunder mengenai komponen bioaktif dan efeknya terhadap sindrom metabolik.	oryzanol, tocols, fenolik).	b. Proses stabilisasi (seperti <i>Infrared Radiation</i> dan Microwave) krusial untuk mencegah ketengikan enzimatis dan mempertahankan bioaktif c. Produk turunan bekatul (minyak, wax, <i>defatted</i> bran) memiliki aplikasi luas sebagai ingredien pangan fungsional.
2	Tuncel, N.Y. (2023) https://doi.org/10.3390/foods12091924	“Stabilization Of Rice Bran: A Review” <i>Foods (MDPI)</i>	Kajian pustaka komprehensif dengan pendekatan deskriptif kualitatif.	Data sekunder dari studi stabilisasi bekatul Asia–Eropa.	Metode oven dan microwave efektif menonaktifkan lipase tanpa menurunkan senyawa bioaktif.
3	Ronie, M.E., Mamat, H., Aziz, A.H.A., & Sarjadi, M.S., Mokhtar, R.A.M., dan Putra, N.R. (2024) https://link.springer.com/10.1007/s10068-024-01709-7	“Rice Bran As A Potent Ingredient: Unveiling Its Potential For Value-Added Applications” <i>Food Science and Biotechnology</i>	Studi eksperimental dan analisis kimia (GC-MS & DPPH).	Bekatul padi putih Malaysia (n=3 varietas).	Bekatul kaya tokoferol dan fitosterol dengan aktivitas antioksidan tinggi; potensial untuk industri pangan.
4	Das, P.P., Gul, M.Z., Weber, A.M., & Srivastava, R.K. (2025)	“Rice Bran Extraction and Stabilization Methods for	Review meta-analisis terhadap metode ekstraksi & stabilisasi.	40 publikasi 2015–2024 tentang biofortifikasi bekatul.	Stabilisasi termal memperkuat bioaktivitas fenolik dan meningkatkan bioavailabilitas oryzanol.

	https://doi.org/10.1093/nutrit/nuae174	Nutrient and Phytochemical Biofortification, Nutraceutical Development, and Dietary Supplementation” <i>Nutrition Reviews</i>			
5	Nath, B., Bari, H., Paul, H., & Omar, M.I. (2025) https://doi.org/10.1002/jsfa.14104	“Rice Bran And Rice Bran Oil Production Perspective In Bangladesh: A Review” <i>Journal of the Science of Food and Agriculture (Wiley)</i>	Studi review berbasis data industri dan nutrisi lokal.	Bekatul dari padi varietas Bangladesh.	Bekatul merupakan hasil samping bernilai ekonomi tinggi, menyumbang 12% dari total gabah.

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian terdahulu, bekatul mengandung protein dengan fraksi dominan berupa albumin dan globulin yang bersifat larut air dan memiliki nilai gizi tinggi, serta profil asam amino esensial yang bervariasi antar genotipe padi. Variabilitas genetik dan proses penggilingan yang tepat berpengaruh signifikan terhadap perolehan protein bekatul, di mana waktu penggilingan singkat menghasilkan kadar protein lebih tinggi dan kandungan pati yang lebih rendah, sehingga mendukung pemanfaatannya sebagai bahan baku tepung kaya protein. Selain kandungan protein, bekatul juga memiliki keunggulan fungsional berupa serat pangan, γ -oryzanol, senyawa fenolik, tokoferol, dan fitosterol yang memberikan manfaat kesehatan, termasuk aktivitas antioksidan, antidiabetik, dan proteksi. Namun, keterbatasan utama pemanfaatan bekatul sebagai pangan adalah ketengikan cepat akibat aktivitas lipase, yang menurunkan mutu sensoris dan nilai gizinya. Oleh karena itu, proses stabilisasi termal terbukti krusial untuk menonaktifkan lipase tanpa merusak protein dan senyawa bioaktif, sehingga bekatul dapat diolah menjadi tepung fungsional dengan mutu yang lebih stabil. Oleh karena itu, kandungan protein nabati yang cukup tinggi, nilai fungsional yang luas, serta

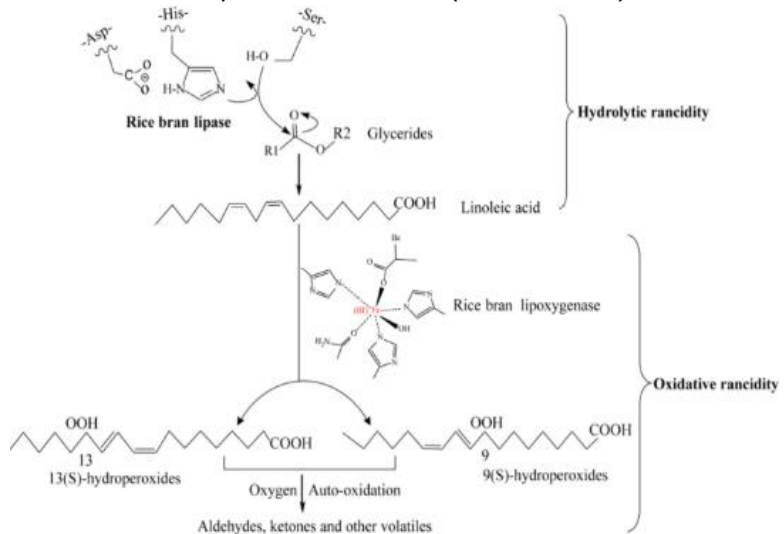
ketersediaan melimpah sebagai hasil samping penggilingan padi, bekatul berpotensi dikembangkan sebagai bahan pangan alternatif bernilai tambah tinggi untuk mendukung diversifikasi pangan dan ketahanan pangan berbasis sumber daya lokal.

1.2.2 Tinjauan Umum Metode Stabilisasi

1. Mekanisme ketengikan pada bekatul

Pada beras yang masih utuh, lemak (lipid) tersimpan dengan aman di dalam bentuk badan lipid yang berada di lapisan aleuron dan germ. Sementara itu, enzim lipase yang dapat merusak lemak berada terpisah di lapisan kulit biji. Pemisahan lokasi ini menyebabkan lemak tidak mudah mengalami kerusakan atau ketengikan selama beras masih utuh (Juliano & Tuano, 2019). Namun, ketika beras mengalami proses penggilingan untuk menghasilkan bekatul, struktur pelindung tersebut rusak secara mekanis. Akibatnya, enzim lipase dan enzim oksidasi yang sebelumnya terpisah dapat berkontak langsung dengan lemak. Hal ini memicu reaksi pemecahan dan oksidasi lemak, yang menghasilkan asam lemak bebas, radikal bebas, serta senyawa volatil seperti aldehid dan keton (Lin *et al.*, 2018).

Senyawa-senyawa inilah yang menyebabkan kenaikan nilai asam dan timbulnya bau tengik pada bekatul dalam waktu singkat (Bhunja *et al.*, 2021). Selain itu, asam lemak bebas yang terbentuk juga dapat menimbulkan rasa pahit dan apek, sehingga menurunkan mutu sensorik bekatul. Secara umum, ketengikan pada bekatul terjadi melalui dua jalur utama, yaitu ketengikan hidrolitik dan ketengikan oksidatif. Selain itu, tingkat ketengikan dedak padi dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti aktivitas mikroba, varietas padi, dan kadar air (Li *et al.*, 2024).



Gambar 1.2 Mekanisme hidrolisis dan ketengikan oksidatif bekatul

Sumber: Zhou *et al.*, 2025

Ketengikan hidrolitik terjadi akibat aktivitas enzim lipase yang memecah trigliserida menjadi asam lemak bebas dan gliserol. Dalam kondisi normal, reaksi ini berlangsung lambat. Namun, bila kondisi lingkungan mendukung, seperti kelembapan tinggi, suhu sesuai, dan pH optimal, aktivitas lipase meningkat secara signifikan (Chen *et al.*, 2022). Pada kondisi tersebut, lipase dengan mudah menempel pada permukaan lemak dan mulai bekerja melalui mekanisme katalitik yang melibatkan tiga asam amino utama, yaitu serin, histidin, dan aspartate atau glutamate (Yu *et al.*, 2023). Melalui serangkaian reaksi kimia, ikatan ester pada trigliserida diputus, sehingga menghasilkan asam lemak bebas. Semakin tinggi aktivitas lipase, semakin cepat akumulasi asam lemak bebas, yang mempercepat proses ketengikan dan pembentukan aroma tidak diinginkan pada bekatul. Oleh karena itu, inaktivasi lipase menjadi tujuan utama dalam proses stabilisasi bekatul untuk memperlambat kerusakan lemak dan memperpanjang masa simpan (Sinha *et al.*, 2020).

Selain ketengikan hidrolitik, bekatul juga mengalami ketengikan oksidatif, terutama disebabkan oleh enzim lipooksigenase. Enzim ini mengoksidasi asam lemak tak jenuh, seperti asam linoleat, asam linolenat, dan arakidonat, menjadi senyawa hidroperoksida lemak (Bollinedi *et al.*, 2020). Senyawa ini bersifat tidak stabil dan mudah terurai menjadi berbagai produk lanjutan, seperti aldehid, keton, dan asam volatil, yang berkontribusi besar terhadap bau tengik (Kontogianni & Gerothanassis, 2022). Lipooksigenase bekerja paling efektif pada asam lemak bebas, sehingga ketengikan hidrolitik seringkali mempercepat ketengikan oksidatif. Dalam bekatul, enzim lipooksigenase dapat menghasilkan dua jenis hidroperoksida utama, yaitu 9-hidroperoksida dan 13-hidroperoksida, tergantung jenis isoenzim yang terlibat. Produk degradasi dari hidroperoksida inilah yang menyebabkan peningkatan nilai asam dan penurunan mutu bekatul secara keseluruhan (Bhunia *et al.*, 2021).

Selain aktivitas enzim, laju ketengikan bekatul juga dipengaruhi oleh beberapa faktor lain, diantaranya yaitu kadar air (aktivitas air), kontaminasi mikroba, dan kandungan senyawa fenolik. Kadar air sangat berperan dalam menentukan kecepatan reaksi ketengikan. Kadar air yang terlalu tinggi dapat mempercepat aktivitas enzim lipase, sedangkan kadar air yang terlalu rendah justru dapat mempercepat oksidasi lemak karena lipid menjadi lebih mudah terpapar oksigen (Mohammadi *et al.*, 2021). Selain itu, kontaminasi mikroba, terutama kapang dan bakteri penghasil lipase, juga dapat memperparah ketengikan.

Mikroorganisme ini menghasilkan enzim tambahan yang mempercepat pemecahan lemak, terutama pada kondisi penyimpanan yang lembap dan hangat (Yu *et al.*, 2021). Sebaliknya, keberadaan senyawa fenolik alami dalam bekatul, seperti flavonoid dan antosianin, diketahui mampu menghambat aktivitas lipase dan memperlambat ketengikan (Chen *et al.*, 2019).

2. Metode stabilisasi bekatul

Proses stabilisasi bekatul merupakan serangkaian perlakuan yang bertujuan untuk inaktivasi enzim penyebab ketengikan, terutama lipase, sehingga memperlambat reaksi hidrolisis lipid dan oksidasi yang dapat menurunkan mutu kimia dan sensorik bekatul selama penyimpanan. Stabilisasi menjadi langkah kritis untuk memungkinkan pemanfaatan bekatul sebagai bahan pangan fungsional karena dapat meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan kimia, mempertahankan komponen gizi, serta potensi bioaktif seperti antioksidan (Tuncel, 2023).

Metode stabilisasi dapat dikelompokkan menjadi *thermal* dan *non-thermal*. Pendekatan *thermal* mencakup pemanasan kering atau basah seperti *hot air heating*, *roasting*, *steaming*, pemanasan mikrowave, serta infra merah yang sebagian besar bertujuan menonaktifkan enzim lipase dan lipooksigenase melalui denaturasi protein enzimatik. Pemanasan termal diketahui dapat menurunkan aktivitas enzim tersebut, menurunkan bilangan asam lemak bebas dan peroksida, serta memperpanjang masa simpan bahan. Namun, pemilihan suhu, durasi, dan jenis metode perlu dioptimalkan karena perlakuan *thermal* juga dapat memengaruhi kandungan senyawa bioaktif seperti vitamin E atau fenolik secara berbeda antara metode yang satu dengan yang lain (Dubey, 2019).

Non-thermal atau metode alternatif seperti plasma dingin, tekanan tinggi, atau gelombang mikro juga telah dieksplorasi untuk mempertahankan kualitas nutrisinya dengan lebih baik sambil tetap menghambat aktivitas enzimatik. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa metode ini mampu mencapai inaktivasi enzim tanpa degradasi signifikan pada komponen bioaktif penting, sehingga berpotensi meningkatkan ketahanan dan kualitas komponen antioksidan dalam bekatul selama penyimpanan. Secara keseluruhan, teknik stabilisasi yang efektif adalah yang mampu menurunkan lipase dan lipooksigenase secara signifikan, menghambat kenaikan asam lemak bebas dan peroksida, serta mempertahankan senyawa bioaktif dan kualitas sensorik bahan pangan (Das *et al.*, 2025).

Proses stabilisasi umumnya dilakukan dengan metode termal seperti oven, microwave, *steaming*, dan *roasting*, yang bekerja melalui peningkatan suhu untuk menghambat reaksi enzimatis (Khasi & Azizkhani, 2022). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa setiap metode memiliki pengaruh berbeda terhadap kandungan gizi, aktivitas antioksidan, dan umur simpan bekatul (Akin *et al.*, 2025).

Metode oven merupakan teknik stabilisasi menggunakan panas kering dengan suhu antara 80–130°C selama 10–60 menit, tergantung kadar air dan jenis varietas padi. Tujuannya adalah untuk menonaktifkan enzim lipase dengan cara menurunkan aktivitas air (Das *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2023). Proses ini mampu menurunkan kadar asam lemak bebas (FFA) hingga 60–80% tanpa mengurangi aktivitas antioksidan secara signifikan (Farooq & Yu, 2025). Metode ini mudah diterapkan dan ekonomis untuk skala industri kecil hingga menengah karena tidak memerlukan peralatan canggih (Reis *et al.*, 2022). Selain itu, pemanasan konvensional memberikan hasil yang stabil dalam menurunkan kadar air dan memperpanjang umur simpan hingga 3 bulan (Khasi & Azizkhani, 2022). Kandungan fenolik dan oryzanol juga relatif terjaga bila suhu dikendalikan di bawah 120°C (Das *et al.*, 2025). Keterbatasan metode oven adalah waktu pemrosesan yang relatif lama dan kemungkinan degradasi nutrisi sensitif panas seperti vitamin B kompleks (Li *et al.*, 2023). Distribusi panas yang tidak merata dapat menyebabkan *overprocessing* pada bagian permukaan bekatul, sehingga menurunkan kualitas warna dan aroma (Ronie *et al.*, 2025). Selain itu, efisiensi energi lebih rendah dibandingkan metode microwave yang bersifat volumetrik.

Metode microwave menggunakan gelombang elektromagnetik (2.45 GHz) untuk menonaktifkan lipase secara volumetrik dan cepat. Energi gelombang diserap langsung oleh molekul air dan lemak, menghasilkan panas internal yang seragam (Reis *et al.*, 2022). Microwave merupakan metode paling efektif dalam menstabilkan bekatul dengan kehilangan nutrisi minimal. Hasil penelitian oleh Das *et al.* (2025) menunjukkan bahwa pemanasan microwave pada 120°C selama 5 menit mampu mempertahankan hingga 95% aktivitas antioksidan dan menurunkan FFA lebih dari 80%. Penelitian oleh Zeng *et al.* (2025) dan Zhou *et al.* (2025) juga menunjukkan bahwa metode ini meningkatkan bioavailabilitas oryzanol dan tokoferol, serta memperpendek waktu proses dibandingkan oven. Selain itu microwave tidak hanya menginaktivasi enzim, tetapi juga mempunyai sifat antibakteri dan insektisida. Namun, dengan

pemanasan berlebih dapat menyebabkan degradasi protein dan perubahan warna (Khasi & Azizkhani, 2022).

Metode *steaming* menggunakan uap air panas (100–120°C) untuk menonaktifkan enzim lipase dengan cara kontak langsung melalui fase uap. Proses ini efektif dalam menghambat oksidasi lipid dan mempertahankan tekstur serta warna alami bekatul (Liu *et al.*, 2025). Keunggulan utama *steaming* adalah distribusi panas yang lebih merata dan efek hidrasi yang mengurangi degradasi senyawa bioaktif. Penelitian oleh Reis *et al.* (2022) menunjukkan bahwa *steaming* selama 10 menit dapat meningkatkan kandungan GABA dan γ -oryzanol hingga 12% dibandingkan metode oven. Selain itu, metode ini menghasilkan aroma yang lebih alami karena tidak terjadi pembentukan senyawa *maillard* berlebih (Das *et al.*, 2025). Kelemahan *steaming* adalah peningkatan kadar air pasca proses sehingga memerlukan tahap pengeringan lanjutan untuk mencegah pertumbuhan mikroba (Ismail, 2021). Waktu dan energi yang dibutuhkan juga lebih tinggi, sehingga kurang efisien untuk produksi massal (Lin *et al.*, 2025). Jika durasi terlalu lama, kandungan fenolik dapat menurun akibat dekomposisi termal dan pencucian senyawa larut air.

Metode *roasting* (sangrai) merupakan teknik pengolahan bahan pangan dengan cara memanaskan bahan menggunakan suhu tinggi tanpa atau dengan sedikit minyak untuk menghasilkan perubahan warna, aroma, rasa, dan tekstur yang khas. Proses sangrai banyak digunakan pada kopi, kakao, kacang-kacangan, dan rempah karena mampu meningkatkan cita rasa melalui reaksi *maillard* dan karamelisasi selama pemanasan (Yang *et al.*, 2023). Prinsip kerja metode sangrai dilakukan dengan mentransfer panas secara langsung atau tidak langsung ke bahan sehingga kadar air menurun dan senyawa volatil pembentuk aroma meningkat (Faisal *et al.*, 2024). Selama proses pemanasan, protein, gula, dan lemak mengalami perubahan kimia yang menghasilkan aroma panggang, warna kecokelatan, serta tekstur yang lebih renyah. Pengaturan suhu dan waktu sangat penting karena suhu terlalu tinggi dapat menyebabkan bahan gosong, kehilangan zat gizi, dan terbentuknya senyawa yang tidak diinginkan seperti akrilamida (El Hosry *et al.*, 2025). Metode sangrai juga dapat meningkatkan stabilitas penyimpanan (umur simpan) produk karena kadar air yang lebih rendah mampu menghambat pertumbuhan mikroorganisme yang dapat menyebabkan kerusakan produk (Rahman *et al.*, 2022).

Kelebihan metode sangrai adalah mampu meningkatkan kualitas sensori produk, terutama aroma, rasa, dan warna, sehingga produk menjadi lebih menarik bagi konsumen (Chen *et al.*, 2022). Selain itu, metode ini relatif sederhana, tidak memerlukan banyak bahan tambahan, dan dapat diterapkan pada skala rumah tangga maupun industri besar dengan biaya operasional yang cukup efisien. Namun, metode sangrai memiliki kekurangan berupa risiko kehilangan beberapa zat gizi sensitif panas seperti vitamin dan antioksidan apabila suhu terlalu tinggi atau waktu pemanasan terlalu lama (Faisal *et al.*, 2024). Kekurangan lain dari metode ini adalah kemungkinan terbentuknya rasa pahit, warna terlalu gelap, serta senyawa berbahaya akibat pemanasan berlebih yang dapat menurunkan mutu produk. Sehingga proses sangrai harus dikontrol secara tepat melalui pengaturan suhu, waktu, dan jenis bahan agar kualitas produk tetap optimal dan aman untuk dikonsumsi (Rozaqi *et al.*, 2023).

Proses stabilisasi memengaruhi kandungan proksimat seperti air, lemak, protein, serat kasar, dan abu pada bekatul. Menurut Ronie *et al.* (2025), perlakuan microwave menurunkan kadar air hingga 6,2% dan meningkatkan kestabilan lemak selama penyimpanan. Hasil serupa dilaporkan oleh Espinales *et al.* (2022), yang menemukan bahwa kadar protein dan serat kasar meningkat akibat penguapan komponen volatil selama proses stabilisasi. Kandungan proksimat yang ideal berkontribusi terhadap stabilitas fungsional dan nilai gizi tepung bekatul (Nath *et al.*, 2025). Dewan *et al.* (2025) melaporkan bahwa perbandingan kadar lemak pada bekatul hasil oven dan microwave tidak berbeda signifikan, namun kandungan fenolik total lebih tinggi pada *microwave*. Selain itu, penelitian terbaru oleh Liu *et al.* (2025) menunjukkan bahwa kombinasi stabilisasi termal dan mikroenkapsulasi mampu meningkatkan umur simpan serta menjaga keseimbangan gizi (karbohidrat 40–45%, protein 15–18%). Oleh karena itu, metode stabilisasi yang dipilih harus mempertimbangkan keseimbangan antara inaktivasi enzim dan menjaga kandungan gizi.

Tabel 1.2 Tabel sintesis metode stabilisasi tepung bekatul

No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
1.	Erturk and Meral, (2019) https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.05.011	“The Impact of Stabilization on Functional, Molecular and Thermal Properties of Rice Bran” <i>Journal of Cereal Science</i>	Desain eksperimental Membandingkan metode Microwave (600, 700, 800 W) dan Oven Konvensional (120, 140, 160°C) Aktivitas lipase, fraksi protein (albumin, globulin, glutelin, prolamin), total fenolik (TPC), aktivitas antioksidan (FRAP), FTIR, dan stabilitas termal (TGA) Metode analisis menggunakan ANOVA satu arah	Bekatul padi varietas Osmancik yang diperoleh dari Tiryaki Agro Food-Industry, Turki, sebanyak 500 g bekatul ditempatkan dalam wadah untuk setiap perlakuan stabilisasi	a. Stabilisasi microwave lebih efektif daripada oven konvensional. Microwave pada 800W secara signifikan meningkatkan aktivitas antioksidan dan total fenolik. b. Microwave menurunkan aktivitas lipase hingga 86% (paling rendah pada perlakuan 800W). c. Oven konvensional cenderung merusak fraksi protein lebih parah dibanding microwave. Microwave dianggap metode terbaik untuk mempertahankan sifat fungsional bekatul
2.	Liu, <i>et al.</i> , (2019) https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1455638	“Impact on the Nutritional Attributes of Rice Bran Following Various Stabilization Procedures”	<i>Systematic Literature Review</i> (Tinjauan Pustaka) Mengkaji berbagai metode stabilisasi (fisik, biologis, kimiawi) dan dampaknya terhadap kandungan gizi.	Berbagai studi literatur mengenai stabilisasi bekatul (tidak menggunakan sampel fisik bekatul secara langsung).	a. Metode pemanasan (Ohmic, Microwave, IR) efektif inaktivasi lipase namun berisiko merusak nutrisi sensitif panas. b. Metode biologis (enzimatis) mahal namun spesifik; metode kimiawi murah namun berisiko residu.

		<i>Critical Reviews In Food Science and Nutrition</i>	Metode analisis yaitu sintesis data dari berbagai penelitian terdahulu mengenai retensi nutrisi (vitamin, polifenol, oryzanol) pasca stabilisasi		c. Pendekatan gabungan (misal: microwave + enzim) disarankan untuk hasil optimal guna mempertahankan senyawa fitokimia dan memperpanjang umur simpan.
3.	Irakli, Lazaridou and Biliaderis, (2021) https://doi.org/10.3390/foods10010057	“Comparative evaluation of the Nutritional, Antinutritional, Functional, and Bioactivity Attributes of Rice Bran Stabilized by Different Heat Treatments” <i>Foods</i>	Desain eksperimental komparatif Membandingkan 3 metode panas: Radiasi Inframerah (IR) (140°C, 15 mnt), Pemanasan Kering/Oven (150°C, 40 mnt), dan Microwave (650W, 2 mnt). Menganalisis proksimat, asam lemak bebas (FFA), aktivitas lipase, bioaktif (γ-oryzanol, tocots), antinutrisi (fitat, saponin), dan sifat fungsional (daya buih, daya serap air/minyak). Metode analisis menggunakan ANOVA dan uji Tukey	Bekatul segar (kadar air 10.93%) dari penggilingan padi lokal di Thessaloniki, Yunani, dan segera distabilisasi.	a. Semua metode efektif menurunkan antinutrisi (fitat, oksalat, saponin). b. Microwave meningkatkan kapasitas pembuihan (<i>foaming</i>) dan emulsifikasi c. Kandungan vitamin E dan fenolik menurun pada semua perlakuan panas, namun aktivitas antioksidan (FRAP/ABTS) justru meningkat atau stabil.
4.	Khasi, R.E., & Azizkhani, M. (2022)	“Evaluating The Physicochemical Properties Of	Eksperimen laboratorium deskriptif-kuantitatif. Analisis	3 jenis bekatul Iran.	Microwave meningkatkan stabilitas oksidatif 2 kali lipat dibanding pengeringan alami.

	https://doi.org/10.1007/s11694-022-01527-7	Barley, Oat, And Iranian Rice Bran Treated By Microwave” <i>Journal of Food Measurement and Characterization</i>	proksimat, fenolik total, dan aktivitas enzim lipase.		
5.	Reis, N., Castanho, A., Pereira, C., dan Brites, C.M. (2022) https://doi.org/10.3390/foods11070912	“Rice Bran Stabilisation And Oil Extraction Using The Microwave-Assisted Method” <i>Foods (MDPI)</i>	Eksperimen laboratorium menggunakan <i>Completely Randomized Design (CRD)</i> ; analisis GC-MS dan DPPH.	Bekatul padi putih dan merah Portugal (n=2 varietas).	Microwave 120°C selama 5 menit menurunkan FFA 85% dan mempertahankan 94% aktivitas antioksidan.
6.	Najamuddin, Gorji and Fitzgerald, (2023) https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103678	“Effect of Post-Milling Process on the Oxidation of the Rice Bran” <i>Journal of Cereal Science</i>	Desain eksperimen Laboratorium (Studi Penyimpanan 90 hari). Membandingkan profil senyawa volatil (bau) antara bekatul stabil yang dihilangkan lemaknya (defatted) dan tidak (non-defatted) dalam kondisi tertutup dan terbuka.	Tepung bekatul padi yang telah distabilisasi (diperoleh dari Sunrice, Australia). Sampel dibagi menjadi kelompok <i>defatted</i> (diekstrak dengan N-Heksana) dan <i>non-defatted</i> . Sebanyak 1 gram sampel dianalisis pada 10	a. Proses penghilangan lemak (<i>defatting</i>) memperpanjang umur simpan, memperlambat oksidasi lipid dan pembentukan senyawa volatil penyebab bau tengik (seperti heksanal) dibandingkan bekatul <i>non-defatted</i> b. Penanda (<i>marker</i>) ketengikan pada bekatul <i>non-defatted</i> adalah aldehida rantai lurus (hexanal, butanal, 2-hexenal) dan asam karboksilat

			Metode analisis yaitu GCxGC-TOFMS untuk analisis senyawa organik volatil, Analisis Multivariat (PCA, OPLS-DA), ANOVA, dan korelasi Pearson	titik waktu berbeda selama 90 hari	c. Bekatul <i>defatted</i> mempertahankan aroma kunci "nutty/cocoa" yang berasal dari senyawa <i>Butanal-2 methyl</i> dan furan d. Tiga jalur utama pembentukan bay yaitu oksidasi lipid, reaksi <i>maillard</i>, dan degradasi <i>strecker</i>.
7.	Tuncel, N.Y. (2023) https://doi.org/10.3390/foods12091924	"Stabilization Of Rice Bran: A Review" <i>Foods (MDPI)</i>	Kajian pustaka sistematis dan evaluatif terhadap metode stabilisasi (oven, <i>steaming</i> , microwave, dan extrusion).	Data sekunder dari >60 publikasi (2010–2022).	Microwave dan oven menghasilkan inaktivasi lipase tertinggi tanpa merusak senyawa bioaktif.
8.	Chowdhury <i>et al.</i> , (2024) https://doi.org/10.1038/s41598-024-74738-1	"Optimization of Microwave Parameters to Enhance Phytochemicals, Antioxidants and Metabolite Profile of De-Oiled Rice Bran" <i>Scientific Reports</i>	Desain eksperimental Laboratorium (optimasi proses). Mengevaluasi efek Microwave dengan variasi daya (300, 600, 800 W) dan durasi (1.5 - 9 menit) terhadap bekatul tanpa lemak (DORB). Menganalisis fitokimia (Fenolik, Flavonoid), Antioksidan (DPPH, ABTS, FRAP),	Bekatul padi tanpa lemak (<i>De-oiled Rice Bran/DORB</i>) yang diperoleh dari Aman Trading Company, India, sebanyak 10 gram bubuk DORB digunakan untuk setiap perlakuan kombinasi daya dan waktu.	a. Perlakuan Microwave 300 watt selama 3 menit adalah kondisi optimal; meningkatkan total fenolik, flavonoid, flavonol, dan aktivitas antioksidan (DPPH, ABTS, FRAP) secara signifikan. b. Paparan mikrogelombang yang terlalu lama pada daya tinggi (800W, 5 menit) justru menurunkan kandungan bioaktif dan antioksidan. c. Analisis metabolomik mengidentifikasi peningkatan metabolit sekunder yang menguntungkan pada sampel yang diberi perlakuan optimal.

			Antinutrisi (Fitat, Oksalat, Tanin), dan Metabolomik berbasis LC-HRMS.		
9.	Zhou, A., <i>et al</i> (2025) https://doi.org/10.3390/molecules30020203	“Microwave And Steam Processing: A Novel Approach To Modifying Rice Bran Characteristics” <i>Molecules (MDPI)</i>	Penelitian eksperimental menggunakan rancangan faktorial (suhu × waktu). Analisis fenolik total dan oksidasi lipid.	Bekatul varietas japonica dan indica.	Kombinasi microwave–steam meningkatkan stabilitas oksidatif dan memperpanjang umur simpan hingga 90 hari.
10.	Zeng, S., <i>et al</i> (2025) https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2477206	“Advancements in Green and Innovative Low Frequency Microwaves for Agricultural Product Processing: A Comprehensive Review” <i>Food Reviews International</i>	Kajian sistematis metode “ <i>green processing</i> ” berbasis microwave dan inframerah.	Produk pertanian tinggi lipid termasuk bekatul dan jagung.	Microwave frekuensi rendah (915 MHz) menghemat energi 30% dan mempertahankan komponen bioaktif lebih baik dari oven.

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa metode stabilisasi berpengaruh signifikan terhadap mutu bekatul, baik dari aspek stabilitas lemak, aktivitas antioksidan, maupun karakteristik sensoris. Metode stabilisasi termal seperti oven, microwave, *steaming*, dan *roasting* memiliki mekanisme pemanasan yang berbeda sehingga menghasilkan dampak yang bervariasi terhadap inaktivasi enzim lipase, retensi senyawa bioaktif, serta perubahan warna, aroma, rasa, dan tekstur. Metode microwave umumnya paling efektif dalam menekan aktivitas lipase dan mempertahankan aktivitas antioksidan, sedangkan oven konvensional dan *roasting* cenderung berisiko menurunkan mutu organoleptik dan senyawa bioaktif akibat pemanasan berlebih atau pelindian nutrisi. Sementara itu, *steaming* dinilai lebih moderat dalam menjaga struktur protein dan karakteristik sensoris, meskipun memerlukan pengeringan lanjutan. Perbedaan respons bekatul terhadap masing-masing metode stabilisasi tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode yang unggul secara mutlak, melainkan efektivitasnya sangat bergantung pada keseimbangan antara inaktivasi enzim, retensi antioksidan, dan penerimaan sensoris. Oleh karena itu, kajian komparatif terhadap metode oven, microwave, *steaming*, dan *roasting* dalam satu rancangan penelitian menjadi penting untuk menentukan metode stabilisasi yang paling optimal.

1.2.3 Tinjauan Umum Mutu Organoleptik

Uji organoleptik juga dikenal sebagai uji indera atau uji sensori, merupakan salah satu metode yang digunakan dalam menganalisis kualitas dan mutu suatu bahan atau produk melalui panca indera manusia (Affrianto *et al.*, 2025). Indera manusia yang digunakan dalam penilaian mencakup penglihatan (warna, kilau, ukuran, bentuk, panjang, lebar, diameter, serta viskositas), peraba (tekstur atau sensasi tekanan yang diamati atau dirasakan melalui mulut maupun sentuhan jari), penciuman (aroma yang dapat menjadi indikator kerusakan produk), pengecap (merasakan manis di ujung lidah, asin di bagian ujung dan sisi lidah, asam di sisi lidah, dan pahit di bagian belakang lidah) (Tingginehe & Simanjuntak, 2022). Parameter yang dinilai yaitu tekstur, warna, bentuk, aroma, dan rasa suatu produk pangan atau minuman (Kholisah *et al.*, 2025). Pengujian organoleptik ini tergolong mudah dan cepat dilakukan, sehingga hasil evaluasi dapat diperoleh dengan segera. Adapun tahapan dalam penilaian organoleptik meliputi menerima sampel produk, mengenali produk, mengklasifikasi karakteristik produk, mengingat kembali sifat-sifat yang telah diamati, dan menguraikan kembali karakteristik inderawi produk (Ayustaningwarno *et al.*, 2020).

Pengujian organoleptik ini berperan penting dalam proses pengembangan produk. Melalui uji organoleptik, dapat digunakan sebagai pendeteksian awal dalam menilai mutu untuk mengetahui penyimpangan dan perubahan dalam produk, menentukan aspek yang perlu dikembangkan, memantau perubahan selama penyimpanan (daya simpan), penyesuaian proses (penggunaan alat dan bahan baru, serta perbaikan proses), mempertahankan mutu dan keseragaman mutu (Ismanto, 2022). Uji organoleptik ini memiliki relevansi yang tinggi terhadap mutu produk karena berhubungan langsung dengan preferensi konsumen. Salah satu penerapannya adalah pemilihan produk atau bahan terbaik berdasarkan kesukaan konsumen. Dalam proses ini, kemampuan indera dalam menilai meliputi kemampuan mendeteksi, mengenali, membedakan, membandingkan, dan kemampuan menilai suka atau tidak suka, di antara beberapa produk sejenis ingin diketahui produk mana yang paling disukai. Untuk tujuan ini, digunakan uji hedonik (Xia *et al.*, 2021).

Uji hedonik merupakan uji dengan metode pengujian yang digunakan untuk membandingkan kualitas dua atau lebih produk sejenis dengan memberikan nilai atau skor pada sejumlah sifat tertentu, serta berfungsi sebagai indikator tingkat kesukaan konsumen terhadap produk. Tingkat kesukaan ini disebut skala hedonik (Usman *et al.*, 2023). Semakin tinggi skor yang diberikan, semakin besar tingkat kesukaan, dan semakin banyak panelis yang dilibatkan,

semakin kecil pengaruh perbedaan individu dan semakin representatif hasilnya terhadap populasi konsumen (Xia *et al.*, 2021). Prinsip dasar uji hedonik adalah panelis memberikan tanggapan subjektif berdasarkan preferensi pribadi mereka, kemudian menyatakannya melalui skala kesukaan yang dikonversi menjadi data numerik. Data tersebut dianalisis secara statistik untuk menentukan produk yang paling disukai. Metode ini sangat berguna sebagai langkah awal dalam evaluasi dan perbaikan produk sebelum dipasarkan, sekaligus untuk memilih produk terbaik dari beberapa alternatif yang tersedia (Ariani *et al.*, 2023).

Dalam melakukan uji organoleptik, terdapat sekelompok orang yang dapat memberikan penilaian secara subjektif terhadap sifat dan mutu suatu objek uji berdasarkan metode pengujian sensori tertentu yang disebut sebagai panel, dan anggotanya disebut sebagai panelis. Berdasarkan keahliannya dalam melakukan penilaian sensori, terdapat tujuh jenis panel. Adapun macam-macam panel, sebagai berikut (Gunawan *et al.*, 2024):

a. Panel perseorangan

Panel perseorangan merupakan individu dengan kepekaan spesifik yang sangat tinggi, mampu bekerja cepat, dan efisien. Kepekaan atau kemampuan sensori ini diperoleh melalui bakat alami atau pelatihan intensif yang panjang. Panel perseorangan yang memiliki kemampuan ini digunakan untuk menghindari bias, menilai pengaruh dari proses yang dilakukan dan penggunaan bahan baku, serta mengenali penyebab penyimpangan mutu produk.

b. Panel terbatas

Panel terbatas merupakan panelis yang terdiri dari 3-5 orang dengan tingkat kepekaan tinggi, sehingga potensi bias dapat diminimalkan. Para panelis ini memahami dengan baik faktor-faktor yang memengaruhi penilaian organoleptik, termasuk proses pengolahan serta dampak bahan baku terhadap produk akhir. Keputusan hasil pengujian sensori ditetapkan melalui diskusi di antara anggota panel.

c. Panel terlatih

Panel terlatih merupakan panelis yang terdiri dari 15–25 orang yang memiliki sensitivitas cukup baik terhadap berbagai karakteristik rangsangan. Untuk meningkatkan ketajaman inderanya, para panelis ini telah melalui proses seleksi serta pelatihan khusus. Keputusan hasil pengujian sensori ditetapkan berdasarkan analisis data secara statistik.

d. Panel agak terlatih

Panel agak terlatih merupakan panelis yang terdiri dari 15–25 orang yang telah menerima pelatihan sebelumnya untuk

mengenali sifat sensorik tertentu. Panel dipilih dari kelompok terbatas dengan menguji tingkat kepekaan mereka terlebih dahulu. Data yang sangat menyimpang dalam pengambilan keputusan hasil pengujian sensori ini dapat diabaikan.

e. Panel tidak terlatih

Panel tidak terlatih merupakan panelis yang terdiri dari 25 orang yang awam yakni orang dewasa dengan jumlah panelis laki-laki dan perempuan yang seimbang, yang dipilih berdasarkan jenis kelamin, etnis, status sosial, dan tingkat pendidikan. Panel ini hanya dapat menilai karakteristik organoleptik dasar, misalnya tingkat kesukaan, namun tidak dapat digunakan untuk analisis perbedaan.

f. Panel konsumen

Panel konsumen merupakan panelis yang terdiri dari 30-100 orang, dengan jumlah yang disesuaikan berdasarkan target pemasaran pasar suatu produk. Panel bersifat sangat umum dan dapat dibentuk berdasarkan daerah atau kelompok masyarakat tertentu.

g. Panel anak-anak

Panel anak-anak merupakan panelis berusia 3-10 tahun, digunakan untuk mengevaluasi produk yang ditujukan bagi anak-anak. Keputusan hasil pengujian sensori mereka dicatat menggunakan formulir khusus yang dilengkapi dengan gambar sebagai panduan.

Tabel 1.3 Tabel sintesis mutu organoleptik tepung bekatul

No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
1.	Espinales Cuesta, A., Tapia, J., Palacios- Ponce, S., Peñas, E., Martínez-Villaluenga, C., Espinoza, A., & Cáceres, P. J. (2022) https://doi.org/10.3390/foods11213328	“The Effect Of Stabilized Rice Bran Addition On Physicochemical , Sensory, And Techno- Functional Properties Of Bread” <i>Foods (MDPI)</i>	Penelitian eksperimental dengan rancangan acak lengkap (RAL) dan uji organoleptik 9-point hedonik scale.	Roti gandum dengan substitusi tepung bekatul 5%, 10%, 15%, 30%.	Penambahan 15% tepung bekatul meningkatkan kadar serat dan antioksidan tanpa menurunkan skor kesukaan panelis terhadap rasa, aroma, dan warna.
2.	Priyadarsani, S., Jena, S., & Jambulkar, N.N. (2025) https://doi.org/10.1007/s11130-025-01387-8	“Evaluation Of Physio- Chemical, Nutritional, And Textural Properties Of Rice Bran Fortified Baked Chips” <i>Plant Foods for Human Nutrition</i>	Eksperimen laboratorium dengan analisis sensori dan tekstur menggunakan ANOVA dan uji LSD.	Biskuit dan keripik non-nixtamalized dengan 10–40% tepung bekatul.	Formulasi 20% tepung bekatul memberikan hasil terbaik untuk warna dan kerenyahan; panelis memberi skor kesukaan >7.0 (kategori suka).
3.	Ronie, M.E., Mamat, H., Aziz, A.H.A., & Sarjadi, M.S. (2025)	“Rice Bran As A Potent Ingredient: Unveiling Its Potential For	Penelitian deskriptif kuantitatif dengan uji hedonik 30 panelis terlatih.	Produk roti, <i>cookies</i> , dan minuman berbasis bekatul.	Produk dengan bekatul stabil microwave memiliki aroma alami dan warna lebih disukai dibanding bekatul mentah; skor keseluruhan 8,1/9.

	https://link.springer.com/10.1007/s10068-024-01709-7	Value-Added Applications" <i>Food Science and Biotechnology</i>			
4.	Nath, B., Bari, H., Paul, H., & Omar, M.I. (2025) https://doi.org/10.1002/jsfa.14104	"Rice Bran And Rice Bran Oil Production Perspective In Bangladesh: A Review" <i>Journal of the Science of Food and Agriculture</i>	Studi deskriptif analisis data sekunder tentang persepsi konsumen terhadap produk berbasis bekatul.	Konsumen produk pangan sehat (n=300) di Bangladesh.	Tingkat penerimaan konsumen terhadap produk bekatul tinggi bila diolah dengan stabilisasi termal (aroma tidak apek, warna cerah).
5.	Das, P.P., Gul, M.Z., Weber, A.M., & Srivastava, R.K. (2025) https://doi.org/10.1093/nutrit/nuae174	"Rice Bran Extraction And Stabilization Methods For Nutrient And Phytochemical Biofortification" <i>Nutrition Reviews</i>	Review analitis terhadap penelitian sensori produk berbasis bekatul.	Studi sensori dari 12 publikasi (2015–2024).	Microwave menghasilkan cita rasa panggang alami dan warna lebih menarik dibanding oven atau <i>steaming</i> .

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa stabilisasi bekatul berperan krusial dalam menentukan mutu organoleptik produk pangan berbasis bekatul, terutama pada parameter aroma, rasa, warna, dan tekstur. Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan bekatul yang telah distabilisasi secara termal, khususnya dengan metode microwave, mampu menghilangkan aroma apek dan rasa pahit khas bekatul mentah, serta menghasilkan warna yang lebih cerah dan cita rasa yang lebih diterima panelis. Produk pangan seperti roti, biskuit, dan keripik yang difortifikasi dengan bekatul stabil umumnya masih memiliki tingkat penerimaan yang tinggi hingga batas substitusi tertentu (sekitar 15–20%), tanpa menurunkan skor kesukaan secara signifikan. Selain itu, perbedaan metode stabilisasi terbukti menghasilkan karakter sensori yang berbeda, di mana microwave cenderung memberikan aroma panggang alami dan warna yang lebih menarik dibandingkan oven konvensional atau *steaming*. Temuan-temuan ini memperkuat dugaan bahwa metode stabilisasi memengaruhi mutu organoleptik secara signifikan, sekaligus mendukung hipotesis penelitian bahwa terdapat perbedaan mutu organoleptik pada tepung bekatul yang distabilisasi menggunakan metode oven, microwave, *steaming*, dan *roasting*. Oleh karena itu, diperlukan penelitian komparatif yang menguji keempat metode stabilisasi tersebut secara langsung untuk menentukan metode paling efektif dalam menghasilkan tepung bekatul dengan mutu organoleptik terbaik sebagai alternatif pangan sumber protein nabati.

1.2.4 Tinjauan Umum Aktivitas Antioksidan

Antioksidan merupakan molekul atau senyawa yang mampu menghambat oksidasi senyawa lain dengan memberikan elektron atau atom hidrogen untuk menetralisasi radikal bebas. Dalam bahan pangan, senyawa antioksidan berperan penting dalam mencegah kerusakan oksidatif pada lipid dan biomolekul lain serta meningkatkan nilai fungsional nutrisi pangan yang dikonsumsi manusia (Laksono *et al.*, 2023). Bekatul diperkaya dengan senyawa antioksidan alami seperti fenolat, flavonoid, γ -oryzanol, dan tokoferol (vitamin E) yang menunjukkan kemampuan scavenging terhadap radikal bebas dan dapat memberikan kontribusi terhadap stabilitas oksidatif bahan dan potensi manfaat kesehatan. Kandungan antioksidan ini dipengaruhi oleh varietas padi, proses penggilingan, serta perlakuan stabilisasi yang diterapkan pada bekatul (Miftahurrahmi *et al.*, 2022).

Aktivitas antioksidan pada bekatul disebabkan oleh keberadaan senyawa bioaktif seperti γ -oryzanol, tokoferol, tokotrienol, asam ferulat, dan fitosterol (Lalita *et al.*, 2025). Senyawa-senyawa ini berperan dalam menetralkan radikal bebas dan mencegah oksidasi lipid yang menyebabkan ketengikan. Penelitian terbaru oleh Ronie *et al.* (2025) melaporkan bahwa proses stabilisasi microwave meningkatkan kapasitas antioksidan hingga 25% dibanding metode konvensional karena inaktivasi cepat enzim lipase tanpa degradasi fenolik. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa pemanasan ringan (80–100°C) selama stabilisasi mampu mempertahankan lebih dari 90% total fenolik pada bekatul (Zhou *et al.*, 2025).

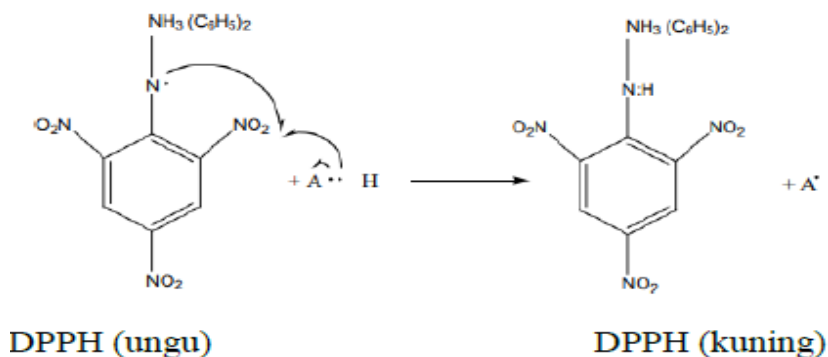
Selain metode termal, beberapa pendekatan non-termal seperti *pulsed electric field* (PEF) dan infrared-vacuum mulai diterapkan untuk mempertahankan aktivitas antioksidan bekatul (Chakraborty *et al.*, 2025). Teknik-teknik tersebut dapat menjaga struktur senyawa fenolik dan flavonoid tanpa menyebabkan kehilangan air yang berlebihan. Hal ini menunjukkan bahwa stabilisasi yang tepat tidak hanya meningkatkan umur simpan tetapi juga mempertahankan bioaktivitas alami bekatul yang berperan penting dalam pencegahan penyakit degeneratif (Nath *et al.*, 2025). Oleh karena itu, pengukuran kadar antioksidan menjadi indikator utama dalam menilai efektivitas proses stabilisasi.

Pemantauan kualitas dan kandungan zat gizi dalam pangan, khususnya terkait antioksidan, umumnya dilakukan dengan menganalisis aktivitas antioksidan sebagai indikator pembandingan yang relevan terhadap kandungan senyawa tersebut dalam suatu produk. Analisis ini juga bertujuan untuk mengendalikan variasi yang terjadi baik dalam satu produk maupun antar produk. Terdapat beberapa metode analisis aktivitas antioksidan yaitu metode DPPH, *Ferric Reducing Antioxidant Power* (FRAP) yang mengevaluasi daya reduksi

terhadap ion besi, atau ABTS untuk menentukan kemampuan senyawa dalam menangkap radikal bebas (Skroza *et al.*, 2022). Radikal bebas merupakan suatu molekul atau senyawa yang mengandung satu atau lebih elektron yang tidak berpasangan pada orbital luarnya. Radikal bebas yang biasa digunakan dalam mengukur daya penangkapan radikal bebas adalah *2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl* (DPPH) karena bersifat stabil (Laksono *et al.*, 2023).

Metode DPPH merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengukur aktivitas antioksidan suatu sampel berdasarkan kemampuannya dalam menetralkan radikal bebas *2,2-difenil-1-pikrilhidrazil* (DPPH). Prinsip metode ini didasarkan pada reaksi reduksi radikal DPPH yang dilarutkan dalam metanol. Radikal DPPH memiliki warna ungu khas, yang akan mengalami perubahan warna apabila bereaksi dengan senyawa antioksidan sebagai pendonor elektron atau atom hidrogen. Ketika larutan DPPH bereaksi dengan senyawa yang memiliki aktivitas antioksidan, radikal bebas DPPH akan tereduksi sehingga intensitas warna ungu berkurang dan berubah menjadi warna kuning, yang berasal dari gugus pikril. Perubahan warna tersebut menunjukkan kemampuan sampel dalam menangkap radikal bebas dan selanjutnya dapat diukur secara spektrofotometri sebagai indikator aktivitas antioksidan (Skroza *et al.*, 2022).

Metode DPPH memiliki beberapa keunggulan, antara lain prosedur analisis yang relatif sederhana, cepat, dan mudah dilakukan, serta memiliki sensitivitas yang tinggi meskipun menggunakan konsentrasi sampel yang rendah. Selain itu, radikal DPPH bersifat stabil, sehingga metode ini lebih praktis dan mudah diaplikasikan dibandingkan dengan metode pengujian antioksidan lainnya, serta tidak membutuhkan substrat karena radikal bebas sudah tersedia secara langsung untuk mengganti substrat (Wulansari, 2018). Prinsip kerja dari metode DPPH yaitu reaksi oksidasi-reduksi. DPPH berfungsi sebagai senyawa radikal bebas stabil yang ditetapkan secara spektrofotometri melalui persen peredaman absorbansi. Dalam melakukan pengujian DPPH perlu dilakukan dalam kondisi yang minim cahaya karena metode ini peka terhadap cahaya dan dapat mengganggu pengujian sehingga menyebabkan ketidakstabilan hasil yang diperoleh (Purwanti, 2019).



Gambar 1.3 Reaksi DPPH dengan antioksidan

Sumber: Laksono et al., 2023

Prinsip pengujian aktivitas antioksidan menggunakan metode DPPH didasarkan pada reaksi antara senyawa antioksidan dan radikal bebas DPPH melalui mekanisme donasi atom hidrogen. Radikal DPPH yang semula berwarna ungu akan mengalami reduksi setelah bereaksi dengan antioksidan, sehingga terjadi perubahan warna menjadi kuning. Perubahan warna tersebut kemudian diukur menggunakan spektrofotometer pada rentang panjang gelombang cahaya tampak, yaitu 380–780 nm. Panjang gelombang 517 nm merupakan panjang gelombang maksimum untuk pengukuran absorbansi DPPH, karena pada panjang gelombang tersebut radikal DPPH memiliki serapan paling kuat akibat keberadaan elektron yang tidak berpasangan (*Laksono et al., 2023*).

Pengujian biasanya dilakukan pada suhu ruang dengan waktu inkubasi sekitar 30 menit dan dalam kondisi gelap untuk mencegah gangguan cahaya terhadap stabilitas radikal DPPH. Secara umum, metode DPPH bekerja dengan mencampurkan radikal bebas yang bersifat stabil dengan senyawa antioksidan yang mampu mendonorkan atom hidrogen. Proses ini menyebabkan penurunan intensitas absorbansi larutan DPPH, yang mencerminkan kemampuan antioksidan dalam menangkap radikal bebas (*Bahri et al., 2025*).

Hasil pengujian dengan metode DPPH menunjukkan bahwa tepung bekatul hasil stabilisasi microwave memiliki nilai IC_{50} sebesar 42,7 $\mu\text{g/mL}$ yang tergolong kuat (*Das et al., 2025*). Menurut Dewan *et al.* (2025), peningkatan aktivitas antioksidan disebabkan oleh pembentukan senyawa *maillard* hasil interaksi antara protein dan karbohidrat selama pemanasan moderat. Selain itu, studi Spaggiari *et al.* (2021) menemukan bahwa bekatul yang dikeringkan dengan suhu rendah memiliki aktivitas antioksidan lebih tinggi dibanding pengeringan konvensional karena kerusakan termal lebih rendah.

Metode stabilisasi juga berpengaruh terhadap komponen fenolik total dan daya reduksi Fe^{3+} (*Ronie et al., 2025*). Pemanasan

cepat seperti microwave dan PEF dapat mempertahankan senyawa fenolik larut, sedangkan pemanasan konvensional cenderung menyebabkan degradasi oksidatif (Chakraborty *et al.*, 2025). Dengan demikian, metode analisis aktivitas antioksidan tidak hanya menggambarkan potensi bioaktif bekatul, tetapi juga efektivitas dari proses stabilisasi yang diterapkan (Tuncel, 2023).

Tabel 1.4 Tabel sintesis analisis aktivitas antioksidan tepung bekatul

No	Peneliti (Tahun) dan Sumber Jurnal	Judul dan Nama Jurnal	Desain Penelitian dan Metode Analisis	Sampel	Temuan
1.	Sohail, <i>et al.</i> , (2017) http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2016.1164120	“Rice Bran Nutraceuticals: A Comprehensive Review” <i>Critical Reviews in Food Science and Nutrition</i>	<i>Comprehensive Review</i> (Tinjauan Pustaka Komprehensif) Mengkaji literatur mengenai nutraseutikal bekatul, teknologi ekstraksi (konvensional dan modern), serta manfaat kesehatan. Sintesis data mengenai efektivitas metode ekstraksi pelarut, <i>Supercritical Fluid Extraction</i> (SFE), <i>Microwave Assisted</i> , dan <i>Ultrasonic Assisted</i> terhadap perolehan senyawa bioaktif	Literatur mengenai bekatul padi sebagai sumber pangan fungsional dan komponen bioaktifnya (gamma-oryzanol, tokofenol, tocotrienol)	γ-oryzanol adalah komponen bioaktif utama yang memiliki aktivitas antioksidan, anti-inflamasi, hipokolesterolemik, dan anti-diabetes
2.	Li, <i>et al.</i> , (2023) https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113483	“Effects Of Rice Bran Rancidity On The Release Of Phenolics And Antioxidative Properties Of Rice Bran	Eksperimental <i>In Vitro</i> . Menginduksi ketengikan pada bekatul (penyimpanan 0-10 hari) dan melakukan simulasi pencernaan lambung-usus.	Bekatul padi (varietas Huang Hua Zhan) dari Changsha, China, disimpan pada suhu 25°C dengan kelembapan 85% selama 0, 1, 5, 7, dan 10 hari untuk	a. Ketengikan bekatul meningkatkan kandungan fenolik terikat (terutama asam ferulat dan p-koumarat) pada serat pangan bekatul . b. Ketengikan menurunkan aktivitas antioksidan pada fase lambung, namun meningkatkan aktivitas antioksidan pada fase

		Dietary Fiber In Vitro Gastrointestinal Digestion Products” <i>Food Research International</i>	Metode Analisis: Profil fenolik (HPLC), Aktivitas antioksidan (DPPH, ABTS, ORAC), dan Model sel HUVEC (ROS, MDA, SOD).	mendapatkan tingkat ketengikan berbeda.	usus karena pelepasan fenolik terikat .
3.	Manzoor, et al., (2023) https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100296	“Rice Bran: Nutritional, Phytochemical, and Pharmacological Profile and its Contribution to Human Health Promotion” <i>Food Chemistry Advances</i>	<i>Review Article</i> (Tinjauan Pustaka) Merangkum profil nutrisi, fitokimia, aktivitas biologis (antikanker, antidiabetes), dan aplikasi pangan bekatul. Kompilasi data mengenai teknik pemrosesan (Ohmic, Microwave, Ekstrusi) dan dampaknya terhadap umur simpan.	Literatur mengenai komponen bioaktif bekatul (gamma-oryzanol, tokoperol, fitosterol) dan aplikasi klinisnya.	Bekatul kaya akan antioksidan (antosianin pada beras warna, gamma-oryzanol) yang efektif melawan diabetes, kanker, dan inflamasi .
4.	Tuncel, N.Y. (2023) https://doi.org/10.3390/foods12091924	“Stabilization Of Rice Bran: A Review” <i>Foods (MDPI)</i>	Kajian pustaka mendalam terhadap dampak stabilisasi termal pada oksidasi lipid dan kapasitas antioksidan.	Data sekunder (50 artikel global).	Stabilisasi termal moderat (80–100°C) mempertahankan 90% aktivitas antioksidan alami serta mencegah degradasi γ -oryzanol dan tokoferol.

5.	Das, P.P., Gul, M.Z., Weber, A.M., & Srivastava, R.K. (2025) https://doi.org/10.1093/nutrit/nuae174	“Rice Bran Extraction And Stabilization Methods For Nutrient And Phytochemical Biofortification” <i>Nutrition Reviews</i>	Review meta-analisis terhadap metode ekstraksi dan stabilisasi bekatul serta dampaknya terhadap aktivitas antioksidan.	Data sekunder dari 40 penelitian (2015–2024)	Stabilisasi microwave meningkatkan kapasitas antioksidan hingga 25% dibandingkan oven konvensional; mempertahankan 95% senyawa fenolik total.
6.	Chakraborty, G., Nagarajan, J., & Kishore, A., Pramod, K., Prabhakar, Yadav, M., and Sharma, A (2025). https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104186	“Valorization Of Pulsed Electric Field-Treated Rice Bran In Cookie Baking: Effects On Stabilization And Application” <i>Journal of Cereal Science</i>	Eksperimen laboratorium dengan rancangan faktorial (PEF treatment × waktu pemanggangan). Analisis DPPH dan FRAP.	Tepung bekatul varietas indica distabilisasi PEF 0–20 kV/cm.	PEF meningkatkan stabilitas antioksidan hingga 28% dan mempertahankan 90% aktivitas fenolik selama pemanggangan
7.	Kodape, Kodape and Desai, (2025) https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141749	“Rice Bran: Nutritional Value, Health Benefits, and Global Implications for Aflatoxin Mitigation,	<i>Review Article</i> (Tinjauan Pustaka). Menganalisis profil nutrisi, keamanan pangan (toksin), dan manfaat kesehatan klinis dari bekatul.	Literatur global mengenai bekatul padi (<i>Oryza sativa</i>), termasuk varietas berpigmen (hitam/merah)	a. Bekatul kaya akan antioksidan (antosianin, gamma-oryzanol) yang efektif melawan diabetes, kanker, dan diare b. Tantangan utama adalah kontaminasi aflatoksin dan arsenik; diperlukan regulasi ketat dan metode stabilisasi yang tepat

		Cancer, Diabetes, and Diarrhea Prevention” <i>Food Chemistry</i>	Kompilasi data mengenai kontaminasi aflatoksin/arsenik, bioavailabilitas nutrisi, dan efek terapeutik		c. Bekatul varietas berpigmen (hitam/merah) memiliki profil nutrisi dan aktivitas antioksidan yang lebih unggul dibandingkan varietas putih
8.	Zhou, L., Huang, J., Du, Y., Li, F., & Liu, S. (2025) https://doi.org/10.3390/foods14091448	“Non-Thermal Stabilization Strategies for Rice Bran: Mechanistic Insights and Industrial Implications” <i>Foods (MDPI)</i>	Studi eksperimental kuantitatif; analisis DPPH, ABTS, dan TPC.	Bekatul varietas japonica distabilisasi dengan <i>infrared-vacuum</i> .	Stabilisasi non-termal mempertahankan hingga 93% total fenolik dan meningkatkan aktivitas antioksidan hingga 20%.
9.	Dewan, M.F., Islam, M.N., Ali, M.A., Rahman, M.M., Shams, S..N., dan Ahiduzzaman, M. (2025) https://doi.org/10.1016/j.fooohum.2025.100752	“Phytochemical And Antioxidant Properties Of Traditional And Modern Aromatic Rice: A Comparative Study” <i>Food and Bioproducts Processing</i>	Studi eksperimen analitik dengan metode spektrofotometri DPPH dan ABTS.	Bekatul dari tiga varietas padi aromatik tradisional dan modern.	Varietas lokal menunjukkan aktivitas antioksidan lebih tinggi (IC ₅₀ 42–45 µg/mL) dibanding modern (IC ₅₀ 60 µg/mL).

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian terdahulu, bekatul kaya akan senyawa antioksidan, terutama γ -oryzanol, senyawa fenolik, tokofenol, dan tokotrienol, yang aktivitasnya banyak dianalisis menggunakan metode DPPH sebagai indikator kemampuan penangkap radikal bebas. Namun, bekatul sangat rentan mengalami ketengikan akibat aktivitas lipase dan oksidasi lipid, yang secara langsung berdampak pada penurunan nilai aktivitas antioksidan DPPH. Oleh karena itu, proses stabilisasi menjadi faktor penentu dalam mempertahankan kemampuan antioksidan bekatul. Literatur menunjukkan bahwa metode stabilisasi termal yang terkontrol, khususnya microwave, mampu menekan degradasi oksidatif dan mempertahankan hingga >90% senyawa fenolik total, yang tercermin dari peningkatan atau kestabilan nilai aktivitas antioksidan berdasarkan uji DPPH dibandingkan metode pemanasan konvensional. Perbedaan metode stabilisasi menghasilkan variasi signifikan pada nilai aktivitas antioksidan yang diukur dengan metode DPPH, di mana microwave, infrared, dan metode non-termal cenderung menghasilkan aktivitas penangkapan radikal yang lebih tinggi dibandingkan oven atau perlakuan panas yang lama. Faktor intensitas panas, durasi pemrosesan, dan karakteristik varietas padi turut memengaruhi hasil uji DPPH. Dengan demikian, kajian pustaka ini mendukung hipotesis bahwa metode stabilisasi oven, microwave, *steaming*, dan *roasting* akan menghasilkan perbedaan nyata terhadap aktivitas antioksidan tepung bekatul, sehingga pengujian menggunakan metode DPPH pada formula terpilih menjadi pendekatan yang tepat untuk menentukan metode stabilisasi paling efektif dalam menghasilkan tepung bekatul sebagai alternatif pangan sumber protein nabati dengan aktivitas antioksidan optimal.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah “Bagaimana pengaruh metode stabilisasi (oven, microwave, *steaming*, dan *roasting*) terhadap mutu organoleptik yang mencakup tingkat kesukaan (warna, aroma, rasa, tekstur, *overall*) dan intensitas karakteristik sensoris (kecerahan warna, keseragaman warna, aroma langu, tengik, sangrai, gosong, kehalusan, dan penggumpalan) pada tepung bekatul, dan menganalisis aktivitas antioksidan pada formula terpilih produk tepung bekatul sebagai alternatif pangan sumber protein nabati?”.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Tujuan umum

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh metode stabilisasi (oven, microwave, *steaming*, dan *roasting*) terhadap mutu organoleptik yang mencakup tingkat kesukaan (warna, aroma, rasa, tekstur, *overall*) dan intensitas karakteristik sensoris (kecerahan warna, keseragaman warna, aroma langu, tengik, sangrai, gosong, kehalusan, dan penggumpalan) pada tepung bekatul, dan menganalisis aktivitas antioksidan pada formula terpilih produk tepung bekatul sebagai alternatif pangan sumber protein nabati.

2. Tujuan khusus

- a. Untuk menganalisis pengaruh metode stabilisasi (oven, microwave, *steaming*, dan *roasting*) terhadap mutu organoleptik yang meliputi tingkat kesukaan (warna, aroma, rasa, tekstur, *overall*) dan intensitas karakteristik sensoris (kecerahan warna, keseragaman warna, aroma langu, tengik, sangrai, gosong, kehalusan, dan penggumpalan) pada tepung bekatul.
- b. Untuk menentukan satu produk tepung bekatul dengan perlakuan metode stabilisasi terpilih yang paling disukai oleh panelis berdasarkan hasil uji organoleptik.
- c. Untuk menganalisis aktivitas antioksidan (metode DPPH) pada tepung bekatul dari hasil metode stabilisasi terpilih berdasarkan hasil uji organoleptik.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Manfaat ilmiah

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam bidang teknologi pangan dan kesehatan. Penelitian ini dapat memberikan pembenaran tentang efektivitas metode stabilisasi dalam mempertahankan mutu organoleptik dan kandungan gizi bekatul, serta berpotensi menjadi dasar bagi penemuan baru dalam pengolahan bahan pangan sumber protein nabati.

2. Manfaat institusi

Penelitian ini bermanfaat bagi institusi tempat penelitian dilakukan, misalnya laboratorium atau universitas, dengan menambah referensi ilmiah, rujukan untuk pengembangan riset lanjutan di bidang pangan dan gizi, khususnya yang berhubungan dengan inovasi pemanfaatan hasil samping pertanian seperti bekatul serta metode stabilisasi bekatul yang sederhana dan efektif untuk meningkatkan mutu dan daya simpan bekatul.

3. Manfaat praktis

Bagi peneliti, penelitian ini memberikan pengalaman langsung dan meningkatkan keterampilan dalam menerapkan metode penelitian ilmiah, termasuk dalam melakukan stabilisasi bahan pangan, menganalisis mutu pangan melalui uji organoleptik, dan analisis aktivitas antioksidan, serta memperluas wawasan tentang pengembangan produk pangan alternatif.

1.5 Definisi Operasional dan Kriteria Objektif

Tabel 1.5 Definisi operasional dan kriteria objektif

Variabel	Definisi Operasional	Alat Ukur	Kriteria Objektif	Skala Pengukuran
Metode Stabilisasi	Perlakuan pemanasan pada bekatul dengan menggunakan metode oven, microwave, <i>steaming</i> , dan <i>roasting</i> , untuk menghentikan aktivitas enzim yang menyebabkan kerusakan mutu.	a. Oven: Pemanasan suhu 120°C selama 5 menit b. Microwave: daya 800 watt selama 2,5 menit c. <i>Steaming</i> : Pengukusan suhu 100±5°C selama 10 menit d. <i>Roasting</i> : disangrai dengan suhu 100±5°C selama 5 menit		Nominal
Mutu Organoleptik	Penilaian mutu tepung bekatul menggunakan panca indra yang mencakup tingkat kesukaan (warna, aroma, rasa, tekstur, <i>overall</i>) oleh panelis konsumen sebanyak 30 orang, serta intensitas karakteristik sensoris (kecerahan warna, keseragaman warna, aroma langu, aroma tengik, aroma sangrai, aroma	Kuesioner uji organoleptik (uji hedonik dan uji mutu organoleptik)	a. Skala hedonik 1-9 (Xia <i>et al.</i> , 2021): 1=sangat tidak suka 2=tidak suka sekali 3=tidak suka 4=agak tidak suka 5=netral/biasa saja 6=agak suka 7=suka 8=suka sekali 9=sangat suka sekali b. Skala intensitas 1-9 : 1 = tidak terdeteksi 2 = sangat lemah 3 = lemah 4 = agak	Ordinal

	gosong, kehalusan, dan tekstur menggumpal) oleh panelis terbatas sebanyak 5 orang.		lemah 5 = sedang 6 = agak kuat 7 = kuat 8 = sangat kuat 9 = sangat kuat sekali	
Aktivitas Antioksidan	Aktivitas antioksidan yaitu kemampuan senyawa bioaktif dalam ekstrak tepung bekatul untuk menghambat radikal bebas DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl). Pengukuran dilakukan dengan menghitung nilai IC_{50} (<i>Inhibition Concentration 50</i>), yaitu konsentrasi ekstrak (ppm) yang diperlukan untuk menghambat 50% radikal bebas setelah inkubasi selama 30 menit.	Spektrofotometer UV-Vis	Klasifikasi aktivitas antioksidan berdasarkan nilai IC_{50} (Lang <i>et al.</i> , 2024): a. Sangat Kuat: <50 ($\mu\text{g/mL}$) b. Kuat: 50–100 ($\mu\text{g/mL}$) c. Sedang: 101–250 ($\mu\text{g/mL}$) d. Lemah: 251–500 ($\mu\text{g/mL}$) e. Tidak aktif: >500 ($\mu\text{g/mL}$)	Rasio