

SIGNIFIKANSI CO₂ SUPERKRITIS PADA PENGOLAHAN UDANG

**Oleh
Maria Erna Kustyawati
Esa Ghanim Fadhallah**

**Jurusan Teknologi Hasil Pertanian
Fakutas Pertanian
Universitas Lampung
2021**

KATA PENGANTAR

Buku berjudul “SIGNIFIKANSI CO₂ SUPERKRITIS PADA PENGOLAHAN UDANG”, merupakan kumpulan hasil penelitian penulis dan diperkaya oleh beberapa penelitian lain yang berkaitan. Penelitian ini telah dilakukan sejak tahun 2010 hingga buku ini diterbitkan.

Teknologi CO₂ superkritis sebagai alternatif teknologi pengolahan belum banyak diaplikasikan, walaupun teknologi ini telah lama digunakan untuk ekstraksi bahan terutama bahan alami yang mudah rusak oleh suhu tinggi dan yang bersifat non polar. Buku ini mengulas tentang inovasi teknologi CO₂ superkritis untuk pengolahan udang tanpa panas untuk meminimalkan kehilangan nilai nutrisi dan fungsional serta mempertahankan sifat kesegaran sehingga meningkatkan nilai konsumen. Selain itu, buku ini juga mengulas signifikansi teknologi CO₂ superkritis terhadap sifat fisik, kimia, mikrobiologi dan mutu udang selama penyimpanan. Fokus tulisan pada Bab 1 dan 2 mengenai teknologi CO₂ superkritis dan Bab 3 hingga Bab 8 mengenai perubahan fisik, kimia, mikrobiologi, dan mutu udang selama penyimpanan oleh teknologi CO₂ superkritis. Buku ini diharapkan menjadi buku acuan bagi yang ingin mempelajari teknologi superkritis CO₂ lebih lanjut dan dapat menambah wawasan untuk memperkaya ilmu pengetahuan. Penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kemenristekdikti untuk Hibah Penelitian Dasar DRPM-RistekDikti dengan No kontrak:065/SP2H/LT/DRPM/2019, untuk penulisan buku ini.
2. Laboratorium Teknologi Industri Pangan, Universitas Sriwijaya, Palembang dan sodari Hapsah, ST., M.Sc yang meminjami unit alat CO₂ superkritis dan membantu proses penelitian.
3. Prof. Filli Pratama, MS.Hon., Ph.D dan Prof. Daniel Saputra, M.Sc., Ph.D yang telah memberi saran dan diskusi dalam penelitian.
4. Prof. Drs. Ag. Bambang Setiyadi, Ph.D dari LP2M Unila yang telah mereview format penulisan buku.

Buku ini belum sempurna, sehingga saran untuk perbaikan sangat diharapkan.

Penulis

SIGNIFIKANSI CO₂ SUPERKRITIS PADA PENGOLAHAN UDANG

ABSTRAK

Pada era kini pengolahan tanpa panas menjadi pusat perhatian bagi pelaku industri pangan, ilmuwan maupun konsumen yang mengutamakan sifat alami produk meliputi kesegaran, nilai gizi, dan sifat fungsionalnya. Teknologi pengolahan menggunakan karbondioksida superkritis merupakan teknologi tanpa panas, karena pada tekanan 1099 psi (7,4 MPa) dan suhu 31,1°C karbon dioksida berada dalam kondisi superkritis yang dicirikan dengan memiliki tegangan permukaan nol, kerapatan rendah seperti gas dan memiliki kelarutan tinggi sehingga mudah berdifusi dan terlarut dalam padatan dan mengakibatkan perubahan struktur senyawa penyusun suatu produk. Semula, teknologi karbon dioksida superkritis digunakan sebagai metode ekstraksi untuk memisahkan komponen-komponen dalam suatu cairan atau padatan menggunakan CO₂ sebagai pelarut. Namun, baru baru ini telah ditemukan bahwa teknologi CO₂ superkritis maupun subkritis CO₂ dapat diterapkan sebagai metode pengolahan tanpa panas untuk produk pangan maupun minuman. Udang mempunyai nilai keutamaan bagi kesehatan manusia terutama adanya asam lemak tidak jenuh, tinggi protein dan karotenoid (astaxantin) sebagai antioksidan, sehingga sangat rentan terhadap proses pengolahan terutama penggunaan panas. Aplikasi teknologi superkritis dan subkritis CO₂ sebagai pengolahan tanpa panas pada udang dikaji di dalam buku ini meliputi perubahan terhadap sifat kimia, fisik, dan fungsional agar dapat diupayakan teknologi yang tepat untuk memperpanjang masa simpannya.

Kata kunci: CO₂ superkritis, CO₂ subkritis, perubahan fisik, kimia, aroma udang.

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| KATA PENGANTAR..... | ii |
| ABSTRAK | iii |
| DAFTAR ISI | iv |
| DAFTAR TABEL | vi |
| DAFTAR GAMBAR..... | vii |
| BAB I. PENDAHULUAN | 1 |
| BAB 2. TEKNOLOGI <i>HIGH PRESSURE CO₂</i> | 3 |
| Pendahuluan | 3 |
| Proses Pengolahan CO ₂ Superkritis..... | 5 |
| Mekanisme Pengolahan CO ₂ Superkritis | 6 |
| Sistem dalam Pengolahan CO ₂ Superkritis | 7 |
| Pengolahan dengan CO ₂ Superkritis | 8 |
| Sifat-sifat Karbon Dioksida Superkritis | 10 |
| Prinsip dan Mekanisme Pengolahan CO ₂ Superkritis | 15 |
| Daftar Pustaka | 16 |
| BAB 3. PERUBAHAN NILAI PROKSIMAT UDANG | 18 |
| Pendahuluan | 18 |
| Warna Udang..... | 23 |
| Daftar Pustaka | 26 |
| BAB 4. MELANOSIS PADA UDANG..... | 28 |
| Pendahuluan | 28 |
| Melanosis pada Pengolahan <i>High Pressure CO₂</i> | 30 |
| Enzim..... | 31 |
| Daftar Pustaka | 32 |
| BAB 5. TEKSTUR DAGING UDANG..... | 34 |
| Pendahuluan | 34 |
| Tekstur | 35 |
| Daftar Pustaka | 38 |

| | |
|--|----|
| BAB 6. KOLESTEROL UDANG..... | 40 |
| Pendahuluan | 40 |
| Penurunan Kolesterol Udang..... | 42 |
| Pengaruh Teknologi CO ₂ Superkritis pada Kolesterol Udang | 43 |
| Oksidasi Kolesterol | 45 |
| Daftar Pustaka | 46 |
| BAB 7. MIKROBIOLOGI UDANG..... | 48 |
| Pendahuluan | 48 |
| Sumber Kontaminan Udang | 49 |
| Kualitas Bakteriologi Udang Beku..... | 50 |
| Inaktivasi Mikroba Udang | 51 |
| Daftar Pustaka | 57 |
| BAB 8. PERUBAHAN MUTU UDANG | 60 |
| Pendahuluan | 60 |
| Parameter Mutu Indikator Kesegaran Udang | 61 |
| Total Volatile Base Nitrogen (TVB-N)..... | 61 |
| Derajat Keasaman (pH) | 63 |
| Lemak dan Bilangan Peroksida | 64 |
| Perubahan ATP udang | 66 |
| Pengolahan dengan Pemanasan | 67 |
| Daftar Pustaka | 69 |
| BIBLIOGRAFI..... | 72 |

DAFTAR TABEL

| Tabel | Halaman |
|--|----------------|
| Tabel 1. Sifat fisik gas, cair dan fluida superkritis karbon dioksida | 12 |
| Tabel 2. Suhu dan tekanan kritis beberapa pelarut dalam fluida superkritis | 12 |
| Tabel 3. Nilai gizi udang per 100 g daging udang yang bisa dimakan. | 19 |
| Tabel 4. Nilai proksimat udang beku selama penyimpanan beku. | 21 |
| Tabel 5. Efek pengolahan CO ₂ bertekanan tinggi terhadap kadar proksimat udang..... | 21 |
| Tabel 6. Komposisi asam amino dan persentase asam amino esensial udang Windu | 22 |
| Tabel 7. Pengaruh perlakuan waktu dan tekanan pada atribut warna udang putih | 25 |
| Tabel 8. Kandungan kolesterol pada beberapa spesies udang | 41 |
| Tabel 9. Efek tekanan dan suhu CO ₂ subkritis terhadap kolesterol udang. | 44 |
| Tabel 10. Pengaruh tekanan dan lama tekan terhadap penurunan jumlah mikroba udang | 51 |
| Tabel 11. Penurunan jumlah bakteri dan kapang dipengaruhi oleh tekanan dan lama waktu proses | 52 |

DAFTAR GAMBAR

| Gambar | Halaman |
|--|---------|
| Gambar 1. Satu unit alat pemrosesan udang menggunakan superkritis karbon dioksida | 5 |
| Gambar 2. Diagram karbondioksida pada suhu dan tekanan berbeda | 13 |
| Gambar 3. Diagram fase CO ₂ pada tekanan dan suhu yang berbeda..... | 13 |
| Gambar 4. <i>Black spot</i> pada telson dan karapas udang..... | 29 |
| Gambar 5. Reaksi black spot pada udang..... | 29 |
| Gambar 6. Skor melanosis udang vaname selama penyimpanan dingin | 30 |
| Gambar 7. Struktur daging udang kondisi segar (kiri) dan busuk (kanan) melalui pengamatan histologis | 36 |
| Gambar 8. Mikrostruktur daging udang menggunakan SEM..... | 36 |
| Gambar 9. Tekstur udang perlakuan teknologi superkritis..... | 37 |
| Gambar 10. Pengaruh suhu dan volume CO ₂ terhadap sisa kolesterol udang..... | 45 |
| Gambar 11. Perubahan nilai TVB-N pada udang selama penyimpanan dingin (4°C)..... | 62 |
| Gambar 12. Perubahan pH pada udang <i>Litopenaeus vannamei</i> selama penyimpanan suhu dingin (4°C)..... | 63 |
| Gambar 13. Perubahan total lemak pada udang selama penyimpanan suhu dingin (4°C)..... | 64 |
| Gambar 14. Perubahan bilangan peroksida udang selama penyimpanan suhu dingin (4°C)..... | 65 |
| Gambar 15. Perubahan nilai K udang putih selama perendaman dalam air es | 67 |

BAB I. PENDAHULUAN

Teknologi tanpa panas (non-termal) merupakan tantangan untuk diaplikasikan sebagai alternatif pengolahan udang. Kebaharuan dan pengembangan teknologi tanpa panas ini berbarengan dengan meningkatnya permintaan konsumen pada makanan yang aman, yang diproses minimal, bebas aditif, dan mutu stabil. Penggunaan teknologi tanpa panas karbon dioksida bertekanan tinggi (*high pressure carbon dioxide/HPCD*) telah menunjukkan potensi untuk menghasilkan makanan dengan karakteristik alami baik jika diterapkan sendiri atau dikombinasikan dengan teknik pengolahan yang lain. Karbon dioksida bertekanan tinggi (HPCD) adalah metode pasteurisasi dingin yang berpengaruh pada mikroorganisme dan enzim, dengan menggunakan tekanan di bawah 50 MPa dan suhu biasanya lebih rendah dari 50°C. Teknologi ini sangat baik untuk diterapkan karena CO₂ tidak beracun, murah, tidak mudah terbakar, dapat didaur ulang dan setelah proses penurunan tekanan (*depressurization*), teknologi ini tidak meninggalkan residu dalam produk. Efektivitas HPCD terhadap inaktivasi PPO sangat banyak dilaporkan pada produk pangan jus buah dan sayuran, seperti jus jeruk, jus apel dan tomat, jus wortel, jus seledri dan bit. Namun penerapan HPCD pada makanan padat belum banyak dipelajari jika dibandingkan dengan produk pangan bentuk cair. Hal ini karena kompleksitas matriks pangan padat yang dapat menyebabkan aksi CO₂ menjadi lebih sulit, dan sedikit informasi tentang mekanisme inaktivasi CO₂, sehingga teknologi HPCD pada makanan padat belum banyak diaplikasikan. Teknologi HPCD memiliki pengaruh yang signifikan di tingkat industri untuk menghasilkan kopi bebas kafein, mengekstrak pigmen dan komponen bioaktif lain, dan telah digunakan untuk menurunkan kolesterol pada daging giling, grill dan makanan lainnya. Karena sifatnya yang tidak beracun, berbiaya rendah dan mudah kembali ke bentuk semula, pelarut superkritis yang paling banyak digunakan dalam industri makanan adalah karbon dioksida (CO₂). Khususnya di produk makanan laut, keuntungan utama dari teknologi karbon dioksida bertekanan tinggi adalah teknologi perlakuan ini umumnya dapat memperpanjang umur simpan dengan cara mengendalikan atau menonaktifkan enzim yang berkaitan dengan kerusakan makanan, mengeliminasi

mikroorganisme pembusuk dan patogen bawaan makanan, mengubah tekstur, menstabilkan warna, dan memperlambat oksidasi lipid.

Udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) sebagai salah satu jenis komoditi hasil laut utama yang disukai oleh masyarakat dalam dan luar negeri. Udang memiliki nilai gizi tinggi, dan berfungsi penting bagi kesehatan manusia. Namun, udang termasuk ke dalam kategori bahan pangan yang sangat rentan terhadap kerusakan dan masa simpan udang sangat pendek. Penanganan paska panen yang umum dilakukan dalam upaya meminimalkan kerusakan udang adalah dengan pendinginan, pembekuan, dan pengolahan panas. Namun teknik tersebut berpengaruh pada kualitas kesegaran, keamanan dan hilangnya nutrisi sebagai akibat susut bobot, munculnya *black spot*, pertumbuhan bakteri pembusuk, perubahan warna, dan penurunan tekstur daging udang.

Dalam upaya mengatasi kelemahan teknologi konvensional tersebut, maka teknologi karbon dioksida bertekanan tinggi berpotensi untuk digunakan sebagai alternatif pada pengawetan udang segar. Teknik ini digunakan untuk mengawetkan udang segar dengan memperhatikan bahwa karbon dioksida bertekanan tinggi dapat membunuh mikroorganisme, menghambat terbentuknya *black spot* dan melanosis tanpa aplikasi suhu tinggi sehingga diharapkan mempengaruhi kualitas kesegaran (*freshness*) udang secara tidak signifikan. Buku ini mengulas tentang karakterisasi teknologi tanpa panas CO₂ superkritis untuk pengolahan udang, perubahan nutrisi udang, melanosis, penurunan kolesterol udang, mikrobiologi udang, dan potensinya dalam mengawetkan udang.

BAB 2. TEKNOLOGI *HIGH PRESSURE CO₂*

Pendahuluan

Pengolahan pangan menggunakan teknologi superkritis karbon dioksida merupakan sebuah *novelty* terhadap perkembangan teknologi pengolahan udang, hal ini karena tanpa keterlibatan panas dalam proses. Teknologi tanpa panas karbon dioksida bertekanan tinggi merupakan pengolahan untuk dapat mempertahankan kualitas kesegaran, gizi, dan fungsional produk walaupun dapat mempengaruhi senyawa nonpolar dan senyawa dengan ikatan non kovalen pada komponen makro dan mikromolekul produk. Teknologi superkritis karbondioksida menjadi salah satu alternatif metode pengolahan karena mempunyai kelebihan yaitu antara dapat mematikan mikroorganisme dan menginaktifkan enzim dalam pangan tanpa menggunakan panas sehingga karakteristik kesegaran, nutrisi terutama protein dan komponen bioaktif lemak tidak jenuh serta komponen volatile aroma yang mudah rusak oleh panas dapat dipertahankan, sekaligus diharapkan dapat memperpanjang masa simpan. Teknologi superkritis CO₂ menjadi salah satu solusi untuk mengatasi pangan maupun bahan pangan yang mudah rusak selama pengolahan sehingga dapat memperpanjang masa simpan pangan tersebut pada kondisi tertentu. Kebutuhan konsumen akan pangan tidak hanya dari segi kesehatan dan keamanan pangan saja tetapi pangan dengan pengolahan minimal (*minimally processed foods*) yang dapat mempertahankan kualitas kesegaran dan cita rasa pada lama penyimpanan tertentu juga menjadi perhatian konsumen. Pemrosesan dengan HPCD terdiri dari memanaskan fluida di atas suhu kritisnya dan memberi penekanan di atas tekanan kritisnya sehingga perbedaan antara cairan dan fase gas menghilang, dan fluida tidak bisa lagi dijadikan cair dengan meningkatkan tekanannya, tidak juga bisa menjadi gas dengan meningkatkan suhunya. Dalam kondisi ini, fluida memperoleh sifat termodinamika dan sifat transpor sedemikian rupa sehingga rasio perpindahan massa zat terlarutnya adalah jauh lebih besar dari pada pelarut cair biasa. Dengan cara memanipulasi kondisi operasi selama pemrosesan dengan HPCD, cairan superkritis dapat secara efektif dan selektif berinteraksi dan mengekstrak komponen

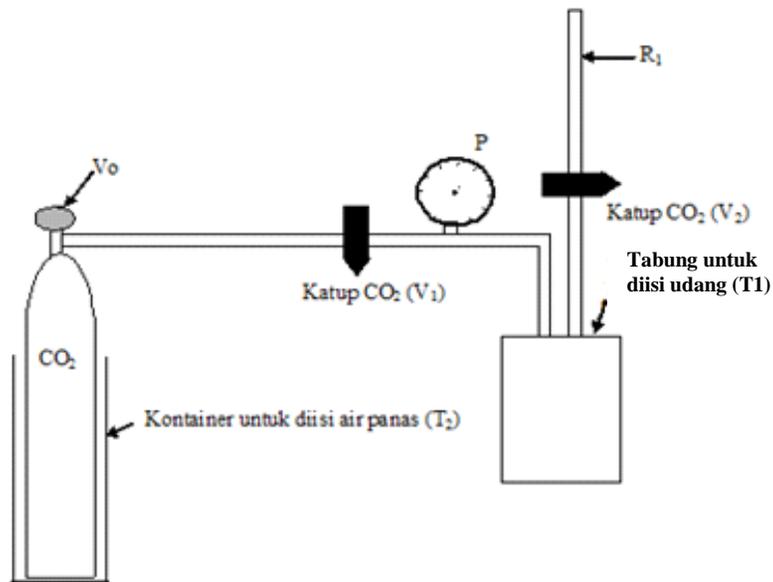
tertentu seperti lemak, minyak, kolesterol, keton, aldehida dan ester sambil meninggalkan protein dan karbohidrat dalam keadaan utuh (Dziezak 1986).

Beberapa penelitian telah menerapkan teknologi karbon dioksida bertekanan tinggi untuk mengawetkan produk buah, sayur dan susu segar (Calvo & Torres, 2010; Valverde et al., 2010). Pengawetan dengan karbon dioksida bertekanan tinggi dapat mempertahankan warna, tekstur, dan aroma produk sekaligus mengurangi jumlah bakteri, sehingga masa simpan produk dapat diperpanjang (Kadam et al., 2012). Selain itu, penerapan karbon dioksida bertekanan tinggi dalam produk pangan tidak berbahaya, tidak beracun dan tidak meninggalkan residu. Teknologi karbondioksida superkritis menjadi salah satu alternatif metode pengolahan karena mempunyai kelebihan dapat mematikan mikroorganisme dan menginaktifkan enzim dalam udang tanpa menggunakan panas, sehingga karakteristik kesegaran, nutrisi terutama protein dan asam lemak tidak jenuh yang mudah rusak oleh panas dapat dipertahankan. Oleh karena itu aplikasi pengolahan CO₂ superkritis untuk udang dapat dilakukan pada tekanan, suhu, dan lama waktu pengolahan tertentu dalam upaya meminimalkan perubahan dalam komponen pangan udang. Perubahan dapat terjadi terhadap sifat fisik terutama warna dan tekstur serta aroma udang setelah pengolahan tanpa panas, sifat kimia terutama kadar air, protein dan lemak, serta komponen bioaktif udang seperti karotenoid (astaxantin) dan asam lemak omega-3, serta kandungan kolesterol udang. Mengingat CO₂ superkritis memiliki sifat non polar dan sedikit polar maka hanya terdapat perubahan yang tidak signifikan terhadap komponen pangan polar.

Teknologi karbon dioksida bertekanan tinggi berpotensi sebagai teknologi untuk mempertahankan kesegaran disamping keamanan pangan mudah rusak merupakan salah satu solusi pengolahan udang. Kelebihan utama dari teknologi bertekanan tinggi CO₂ adalah mampu mengolah makanan pada suhu ambient atau lebih rendah, mampu memancarkan tekanan secara cepat dan seragam keseluruh sistem tanpa memperhatikan ukuran dan geometri, dan dapat digunakan untuk membuat inovasi ingredien pangan yang bersifat fungsional. Perlakuan bertekanan tinggi pada umumnya akan merusak ikatan kovalen di dalam molekul jika diberi tekanan yang besar. Oleh karena itu berbeda dengan perlakuan yang mendayagunakan panas, penerapan karbondioksida bertekanan tinggi tidak merusak kandungan nutrisi, flavor, rasa, warna, dan kandungan vitamin, dan bahan pangan.

Komponen mikromolekul bahan pangan meliputi asam amino, vitamin, dan komponen aroma tidak rusak oleh karbondioksida bertekanan tinggi, tetapi protein, enzim, polisakarida, dan asam nukleat yang tergolong komponen makromolekul pangan akan mengalami perubahan struktur. Mengingat CO₂ superkritis memiliki sifat non polar dan sedikit polar maka hanya terdapat perubahan yang tidak signifikan terhadap komponen pangan polar.

Unit peralatan karbon dioksida bertekanan tinggi untuk prosesi bahan pangan (tempe, udang) yaitu terdiri dari tabung baja tahan tekanan tinggi, tabung gas karbon dioksida, jaket pemanas, dan pipa baja tahan tekanan tinggi. Diagram peralatan untuk proses perlakuan dengan karbon dioksida bertekanan tinggi seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Satu unit alat pemrosesan udang menggunakan superkritis karbon dioksida

Proses Pengolahan CO₂ Superkritis

Proses pengolahan pangan dengan gas CO₂ bertekanan tinggi seperti yang diterangkan oleh Kustyawati et al. (2015) adalah sebagai berikut: udang ukuran 25 diletakkan ke dalam tabung tekan secara aseptis yaitu menggunakan alkohol 70% sebagai desinfeksi peralatan dan tempat pemrosesan udang. Tabung tekan ditutup rapat dengan memperhatikan karet *seal* pada tutup tabung yang berfungsi menciptakan kondisi tabung

rapat vakum. Selanjutnya, aliran gas CO₂ dimasukkan sampai tekanan mencapai tekanan 900, 950 dan 1100 psi dengan mengatur suhu. Tekanan dilakukan selama 5, 10, dan 15 menit, kemudian gas dilepas dari tabung dengan membuka katup secara perlahan-lahan untuk menghindari kerusakan udang dan menahan aroma udang. Udag kemudian dikeluarkan dari tabung tekan dan dianalisis. Dalam penelitian ini diperlukan waktu 2 hingga 3 menit untuk membebaskan tekanan dari dalam tabung. Udag kemudian dikeluarkan dari tabung tekan dan disimpan dalam suhu refrigerator untuk dianalisa kimia, sedangkan udang segera diamati untuk analisa warna, tekstur, mikrobiologi, mikrostruktur, dan proksimat, serta organoleptik. Suhu dan tekanan karbon dioksida bertekanan tinggi diatur dengan menambahkan air panas atau es sebagai berikut: pada suhu $25\pm 2^{\circ}\text{C}$, tekanan gas CO₂ pada 900 psi (6,3MPa), suhu $27\pm 2^{\circ}\text{C}$ tekanan gas CO₂ 950 psi (6,6MPa) dan untuk mencapai tekanan 1100 Psi (7,6MPa) suhu dinaikkan sampai $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ dengan menambahkan air panas ke dalam kontainer. Sebaliknya untuk menurunkan suhu ditambahkan es ke dalam kontainer.

Penentuan tekanan pada suhu tertentu dan waktu perlakuan berdasarkan pada beberapa penelitian yang dilakukan pada pengolahan tempeh (Kustyawati et al., 2016). Karbon dioksida dalam fase superkritis pada tekanan 7,35 MPa/1099 psi, suhu 31,1 °C, sementara pada tekanan dan suhu di bawah fase superkritis adalah subkritis (Gambar 2.2). Pada pengolahan udang menggunakan beberapa variasi tekanan dan suhu yaitu 1100 psi/ 7,6 MPa dengan suhu 35°C, 950 psi dengan suhu 29°C, dan 900 psi/ 6,3 MPa dengan suhu 25°C.

Mekanisme Pengolahan CO₂ Superkritis

Mekanisme proses CO₂ bertekanan tinggi melibatkan sebuah tahapan pasturisasi menggunakan CO₂ dengan mengatur lama waktu penetrasi CO₂ ke dalam sel mikroorganisme, dan diikuti suatu dekompresi secara tiba tiba sehingga menimbulkan suatu ledakan. Dekompresi ledakan ini hasil dari ekspansi gas yang cepat dalam sel mikroba. Suhu untuk proses pasturisasi dengan CO₂ tekanan tinggi berkisar 20°C hingga 60°C untuk menghindari kerusakan termal terhadap makanan olahan, sementara rentang tekanan proses antara 7,0 MPa untuk 40,06 MPa. Kenaikan suhu yang disebabkan oleh

tekanan yang ditingkatkan hampir nol karena tekanan yang relatif rendah yang terlibat dalam proses. Lama waktu perlakuan pengolahan berkisar dari sekitar 3 dan 9 menit hingga sekitar 120 dan 140 menit tergantung pada tipe peralatan HPCD, yaitu tipe kontinyu, semi-kontinyu atau *batch*. Lama waktu perlakuan juga tergantung pada jenis makanan yang sedang diproses.

Beberapa tahapan/langkah dalam proses inaktivasi sel mikroorganisme dengan CO₂ tekanan tinggi dapat disederhanakan seperti di bawah ini. Langkah-langkah ini tidak terjadi secara berurutan selama proses tetapi akan berlangsung serentak dalam kompleks dan dengan cara yang saling terkait. (1) Pelarutan CO₂ bertekanan di luar fase cair, (2) Modifikasi membran sel, (3) Penurunan pH intraseluler, (4) Inaktivasi enzim kunci/penghambatan metabolisme sel karena penurunan pH internal, (5) Efek (penghambatan) langsung CO₂ molekuler dan HCO₃⁻ pada metabolisme, (6) Gangguan keseimbangan elektrolit intraseluler, (7) Pемindahan konstituen vital dari sel dan sel membrane.

Pelarutan CO₂ bertekanan di luar fase cair, dalam makanan dengan kadar air tinggi, CO₂ (yang terdapat dalam *headspace reactor*) dapat terlarut dalam air untuk membentuk asam karbonat (H₂CO₃) yang berdisosiasi menjadi bikarbonat, karbonat dan spesies ion hidrogen. Air bersentuhan dengan CO₂ bertekanan umumnya menjadi asam karena pembentukan dan disosiasi H₂CO₃, yang membebaskan ion H⁺. Menurunnya pH ekstraseluler dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Hal ini juga dapat menurunkan resistensi mikroba terhadap inaktivasi karena konsumsi energi meningkat mempertahankan pH homeostasis.

Sistem dalam Pengolahan CO₂ Superkritis

Beberapa system untuk pengolahan menggunakan CO₂ bertekanan tinggi adalah meliputi sistem *batch* dan sistem *continuous micro-bubble*.

Sistem *batch*. Pada sistem *batch*, sampel diletakkan ke dalam tabung bertekanan dan dilakukan pengaturan suhu gas CO₂ sesuai yang diperlukan. Selanjutnya, gas CO₂ dialirkan ke dalam tabung bertekanan melalui pipa pipa baja hingga seluruh sampel berada pada kondisi jenuh dengan cara mengatur suhu dan tekanan pada instrument atau unit pengolahan CO₂ bertekanan tinggi. Sampel dibiarkan di dalam tabung bertekanan selama

periode waktu tertentu sesuai yang diperlukan, selanjutnya pipa outlet dibuka untuk membebaskan gas CO₂. Beberapa instrument CO₂ bertekanan tinggi memiliki agitator untuk mengurangi waktu yang diperlukan sampel hingga mencapai jenuh dengan CO₂.

Sistem *continuous micro-bubble*. Pada sistem ini larutan campuran CO₂ dan garam dialirkan ke dalam tabung bertekanan melalui pipa baja. Sebuah evaporator digunakan untuk mengkonversi CO₂ liquid menjadi gas dan kemudian didispersikan ke dalam larutan garam dari filter baja dengan ukuran pori pori 10µm. Gelembung mikro bergerak ke atas bersamaan dengan proses pelarutan ke dalam larutan garam. Kemudian, larutan garam yang telah jenuh dengan CO₂ dialirkan melalui pemanas hingga mencapai suhu yang diinginkan dan suspensi mikroorganisme dipompa ke tabung berisi larutan garam jenuh CO₂. Sebuah kumparan lain dengan pemanas digunakan untuk menyesuaikan waktu tinggal.

Pengolahan dengan CO₂ Superkritis

Karbon dioksida (CO₂) adalah gas tidak beracun, memiliki sifat anti-mikroba, dan penggunaan CO₂ sebagai ingredient diterima oleh industri makanan maupun minuman. Karbon dioksida efektif untuk memperpanjang umur simpan makanan yang mudah rusak dengan memperlambat pertumbuhan mikroba. Efek keseluruhan dari CO₂ adalah untuk meningkatkan baik fase lag dan waktu generasi (t) mikroorganisme pembusuk dan pada tekanan tertentu CO₂ dapat membunuh bakteri, khamir dan kapang. Efek CO₂ terhadap kematian mikroorganisme bersifat sinergis dengan kenaikan suhu, keasaman pH, dan antagonistik dengan Aw yang menurun. Substrat atau media yang digunakan dalam teknologi CO₂ tekanan tinggi ini adalah CO₂ subkritis atau CO₂ superkritis. Produk pangan dipapar dalam medium CO₂ subkritis maupun CO₂ superkritis agar terjadi kontak antara produk dengan medium dengan besaran tekanan dan lama waktu tertentu baik dalam system batch, semi-batch atau berkelanjutan.

Karbon dioksida superkritis (SC CO₂), disebut juga sebagai karbon dioksida fase padat, memiliki potensi sebagai alternatif dalam penggunaan pelarut kimia. Selama tiga dekade terakhir, teknologi SC CO₂ ini telah dipelajari dan digunakan untuk ekstraksi dan isolasi senyawa bernilai tinggi yang berasal dari bahan alami, dan khususnya bahan nabati. SC CO₂ berupa suatu fluida yang bukan padat maupun cair, namun demikian SC CO₂ ini

memiliki kerapatan yang tinggi sehubungan dengan sifatnya yang berupa gas CO₂. Pada tekanan dan suhu yang relatif rendah, karbon dioksida berubah ke fase superkritis yaitu berupa fluida. Pada bentuk fluida SC CO₂ mempunyai karakteristik yang mudah berpenetrasi ke dalam substrat, hal inilah yang mengawali penggunaan SC CO₂ di berbagai area mulai dari bioremediasi hingga ekstraksi produk alami. Teknologi SC CO₂ mengalami perkembangan lebih lanjut yaitu sebagai metode alternatif pasturisasi untuk makanan. Tujuan utama dari teknologi ini adalah mengeliminasi mikroorganisme patogen dan pembusuk dengan pengolahan yang tidak mengakibatkan kerusakan terhadap kualitas makanan tersebut. Teknologi pasturisasi makanan dengan SC CO₂ ini mampu menginaktivasi mikroorganisme di dalam makanan cair maupun padat, baik inaktivasi sel vegetative maupun spora bakteri.

Teknologi Tekanan Tinggi (*high pressure technology*/HPT) termasuk di dalamnya adalah teknologi karbon dioksida tekanan tinggi semakin populer dikalangan industri pengolahan makanan tidak hanya karena kemampuannya dalam mengawetkan makanan tetapi juga karena potensi efeknya mempunyai fungsi tertentu terhadap produk makanan yang dihasilkan. Tingkat tekanan yang digunakan dalam teknik pengolahan tekanan tinggi (HPT) untuk pengolahan produk makanan tampaknya hanya mempunyai efek kecil terhadap ikatan kovalen molekul penyusun komponen makanan, sehingga makanan yang dipapar atau diolah dengan teknologi tinggi pada suhu ruang atau mendekati suhu ruang tidak akan menghasilkan terjadinya transformasi kimia yang signifikan. Teknologi tekanan tinggi ini semakin berkembang dengan meningkatnya permintaan konsumen akan pangan dengan nilai nutrisi tinggi dan tanpa kehilangan nilai kesegaran makanan. Fenomena mekanisme pengaruh kelarutan dan kerapatan karbon dioksida bertekanan tinggi telah banyak diaplikasikan untuk eliminasi mikroorganisme dan pengolahan bahan pangan yang bertujuan antara lain: (1) untuk mempertahankan kesegaran produk pangan misalnya kimchi); jus apel (Liao et al., 2010), dan susu kambing; (2) untuk pasteurisasi produk pangan seperti pada must anggur dan pasta tomat; paprika (Calvo & Torres, 2010), telur utuh, biji alfafa, dekontaminasi bakteri patogen, (3) sterilisasi peralatan medis dan sterilisasi spora *Bacillus pumilus*, *Geobacillus stearothermophilus* dan *Bacillus subtilis* di dalam produk pangan (Mathias et al., 2010); (4) untuk ekstraksi bahan aktif tanaman obat

dan minyak atsiri, dekafeinasi kopi; dan (5) untuk menarik antibiotik dalam udang (Pratama et al., 2007), dan untuk membawa dan menahan komponen aroma yang dimasukkan ke dalam bahan, misalnya pada proses pewangian beras giling. Teknologi karbon dioksida bertekanan tinggi berpotensi untuk digunakan pada pengawetan tempeh segar. Teknik ini digunakan untuk mengawetkan tempe dengan memperhatikan bahwa karbon dioksida bertekanan tinggi dapat membunuh mikroorganisme tanpa aplikasi suhu tinggi sehingga diharapkan mempengaruhi kualitas tempe segar secara tidak signifikan. Tempe segar yang diproses menggunakan karbon dioksida pada tekanan 1.100 Psi (7,6MPa suhu 35°C) selama 15 menit mengalami perubahan fisik yang tidak signifikan selama tiga hari penyimpanan pada suhu ruang. Teknologi karbon dioksida bertekanan tinggi sesuai diaplikasikan pada pangan karena ramah lingkungan dan tidak meninggalkan residu bahan kimia.

Selain teknik pembekuan, melakukan pengawetan udang menggunakan senyawa metabolit *Lactobacillus lactis* yang mengandung bacteriosin Nisin melalui perendaman selama 60 menit. Ekstrak air bawang putih juga mampu menurunkan total lempeng bakteri di dalam udang. Kandungan alisin dalam bawang putih mempunyai aktivitas antibakteri. Namun hasil penelitian ini belum diketahui efektivitas inaktivasinya. Biopreservasi udang kupas kulit menggunakan senyawa polifenol ekstrak kulit buah kaktus dapat mengurangi mikroba pembusuk selama penyimpanan refrigerasi namun teknik ekstraksi ini masih memerlukan standarisasi, disamping senyawa polifenol tidak signifikan mempengaruhi oksidasi lipid. Teknik perendaman udang menggunakan senyawa antioksidan tokoferol dapat mengurangi oksidasi lipid selama penyimpanan pada suhu beku, namun teknik ini mengurangi integritas tekstur daging udang, sedangkan perendaman udang vaname menggunakan sodium tripolipospat (STPP) dapat menambah berat dan memenuhi standard keamanan mikrobiologi, namun perlu dikaji penggunaan STPP secara ekonomi dan keefektifannya untuk pengawetan udang.

Sifat-sifat Karbon Dioksida Superkritis

Karbon dioksida terdapat di udara dalam bentuk gas dan dapat juga larut di dalam air, tidak bersifat dipol (nonpolar), tidak beracun, tidak reaktif dan tidak mudah terbakar. Molekul CO₂ bersifat nonpolar karena muatan parsial positif terdapat pada atom C dan

muatan parsial negatif terdapat pada atom O sehingga momen ikatan pada CO_2 memiliki arah dari atom C ke atom O, dan saling meniadakan akibatnya momen dipolnya bernilai nol (Beckman, 2004). Karbon dioksida adalah suatu gas yang dapat berbentuk padat, cair dan fluida superkritis pada tekanan dan suhu tertentu (Labouteur et al., 2015), seperti pada Gambar 2. Pada titik kritis dan di daerah superkritis (suhu $31,1^\circ\text{C}$ dan tekanan $7,35 \text{ MPa}$), CO_2 berada pada fase superkritis dan fluida yang homogen, meningkatnya suhu atau tekanan di atas titik kritis tidak menghasilkan perubahan fase CO_2 . Di bawah titik kritis dan di atas titik triple ($-55,66^\circ\text{C}$ dan $5,11 \text{ atm}$), CO_2 berada dalam fase cair. Pada fase yang sama dengan suhu yang berbeda CO_2 mempunyai kelarutan yang berbeda. Pada Tabel 1, fluida superkritis mempunyai keunggulan karena mempunyai kedua sifat fisik gas dan sifat fisik cairan sehingga lebih mudah dilakukan manipulasi di laboratorium. Diantara fluida superkritis, CO_2 sebagai salah satu senyawa yang digunakan secara luas oleh beberapa alasan, antara lain yaitu: (1) suhu dan tekanan kritis yang rendah sehingga memudahkan proses instrumentasi dan tidak ada degradasi analit, (2) polar seperti alkohol, asetonitril, dan apolar seperti pada toluene, hexan, (3) toksisitanya rendah, tidak berbau, tidak mudah terbakar, tidak mudah korosi, (4) mudah diperoleh dalam jumlah besar dengan kualitas tinggi dengan harga rendah.

Fluida superkritis memiliki densitas seperti cairan, viskositas seperti gas, dan sifat kompresibilitas seperti gas. Fluida superkritis mempunyai sifat kompresibilitas yang sangat tinggi sehingga sifat ini menunjukkan bahwa densitas fluida dapat berubah-ubah dengan berubahnya tekanan dan suhu. Berbeda dengan CO_2 pada fase cair yang memiliki densitas constant pada tekanan di bawah 300 bar. Disamping itu, polaritas fluida superkritis meningkat sejalan dengan densitas yang berarti bahwa perubahan tekanan dan/atau suhu mengakibatkan kekuatan elusi bervariasi. Fluida superkritis mempunyai difusivitas lebih tinggi dari cairan dan lebih rendah dari gas, atau diantara cairan dan gas, sehingga dapat berfungsi sebagai solven. Karakteristik fluida ini mudah diubah dengan hanya mengatur tekanan dan atau suhu. Fluida mempunyai karakteristik yang berbeda dengan pelarut biasa oleh adanya daya solubilitas seperti cairan dan difusivitas tinggi seperti gas serta viskositas rendah. CO_2 superkritis berada sebagai fase tunggal pada suhu dan tekanan di atas nilai titik kritisnya yaitu $T_c = 31,1^\circ\text{C}$, $P_c = 7,38 \text{ MPa}$, dan pada fase ini CO_2 superkritis memiliki

kemampuan unik untuk berdifusi melalui padatan seperti gas, dan melarutkan bahan seperti cairan Gambar 3. Selain itu, CO₂ superkritis dapat dengan mudah mengubah sifat kepadatannya oleh adanya perubahan kecil dalam suhu atau tekanan. Keadaan ini CO₂ superkritis menghasilkan daya pelarut yang sangat baik bila digunakan dalam pasteurisasi. Ketika CO₂ gas atau CO₂ cairan dipanaskan dan dikompresi di atas suhu kritis (31°C) dan tekanan (73 atm), maka baik CO₂ gas atau CO₂ cairan menjadi padat, cairan yang sangat kompresibel yang menunjukkan sifat sebagai cair dan gas. Namun demikian, pada tekanan dan suhu yang relatif rendah, karbon dioksida berubah ke fase superkritis. CO₂ cair memiliki beberapa sifat pelarut seperti pada sifat yang dimiliki oleh CO₂ superkritis, yaitu viskositas rendah dan koefisien difusi tinggi, oleh karena itu, istilah cairan-memadat mengacu pada kedua fase superkritis dan fase cair. Sifat-sifat CO₂ superkritis membantu CO₂ cair dan padat menembus dalam ke dalam makanan/ substrat. Sifat-sifat tersebut dapat dikontrol melalui pengaturan suhu dan tekanan. Oleh karena itu, perubahan kecil terhadap suhu dan tekanan pada titik mendekati titik kritis (near the critical point) memiliki perubahan signifikan terhadap densitas, solubilitas dan konstanta dielektrik (*dielectric constant*).

Tabel 1. Sifat fisik gas, cair dan fluida superkritis karbon dioksida

| Karakteristik | Densitas (kg/dm ³) | Viskositas (Pa s) | Difusivitas (m ² /s) |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Gas | (0,6-2,0) x 10 ⁻³ | (0,6 – 2,0) x 10 ⁻² | 0,2 |
| Cairan (liquid) | 0,5 | 5 x 10 ⁻² | 5 x 10 ⁻⁴ |
| Fluida superkritis | 1 | 1 | 10 ⁻⁵ |

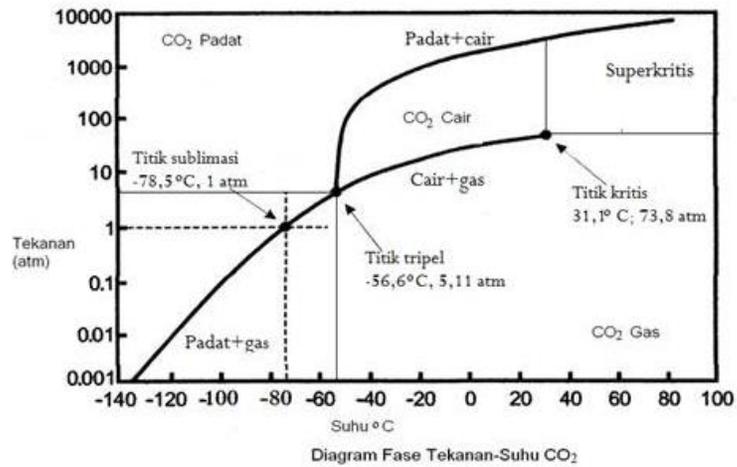
Sumber: Labouteur et al. (2015)

Tabel 2. Suhu dan tekanan kritis beberapa pelarut dalam fluida superkritis

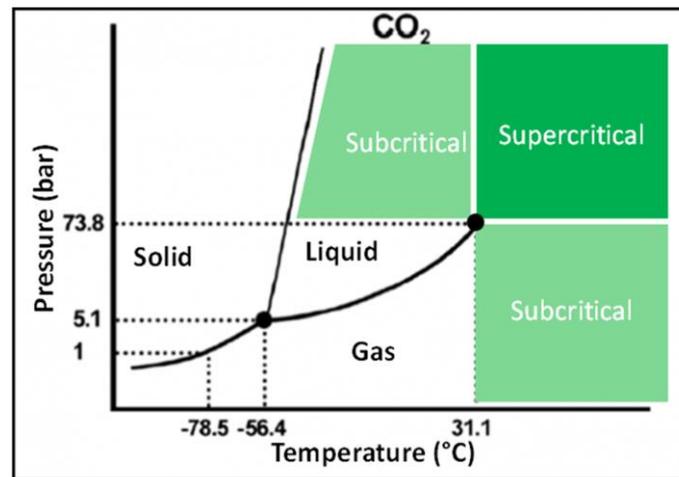
| Pelarut | Suhu kritis (T _c °C) | Tekanan kritis (T _c M.Pa) |
|----------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Ammonia | 132.4 | 11.3 |
| Carbon dioxide | 31.1 | 7.4 |
| Ethane | 32.5 | 4.9 |
| Ethanol | 243.1 | 6.4 |
| Nitrous Oxide | 36.6 | 7.2 |

| Pelarut | Suhu kritis (T_c °C) | Tekanan kritis (T_c M.Pa) |
|------------------|-------------------------|------------------------------|
| Propane | 96.8 | 4.3 |
| Trifluoromethane | 26.0 | 4.7 |
| Water | 374.1 | 22.1 |

Sumber: Labouteur et al. (2015)



Gambar 2. Diagram karbondioksida pada suhu dan tekanan berbeda
Sumber: Labouteur et al. (2015)



Gambar 3. Diagram fase CO₂ pada tekanan dan suhu yang berbeda
Sumber: Labouteur et al. (2015)

Karbon dioksida superkritis memiliki sifat tegangan permukaan nol karena tidak ada batas antara sifat gas dan cair sehingga mudah berdifusi dalam padatan. Karbon dioksida superkritis mempunyai sifat polar hingga agak-polar, dan memiliki kelarutan tinggi seperti perilaku zat cair sehingga mudah melarutkan senyawa nonpolar (Backman, 2004). Karbon dioksida superkritis dapat dikeluarkan atau diuapkan dari material tanpa menyisakan residu. Karbon dioksida cair bersifat tidak mudah terbakar, tidak beracun dan berfungsi sebagai pelarut dalam ekstraksi, seperti ekstraksi lemak dari rice bran, dan ekstraksi senyawa obat dan aroma dari tanaman (Besbes, 2017). Pada tekanan di bawah 5,11 atm karbon dioksida langsung menjadi padat atau disebut es kering pada temperatur di bawah -78°C . Karbon dioksida padat atau *dry ice* berfungsi sebagai pengawet dalam industri pengawetan pangan maupun spesimen. Teknologi karbon dioksida superkritis mempunyai keutamaan antara lain: 1) dapat membunuh mikroorganisme pada suhu ruang atau bahkan pada suhu lebih rendah sehingga dapat mempertahankan kesegaran produk (Valverde et al., 2010); 2) dapat mempertahankan nilai gizi dengan menginaktifkan enzim tanpa panas; 3) dapat menghilangkan senyawa yang tidak diinginkan misalnya produk udang bebas khloramfenikol karena sifat non-polar CO_2 dapat menarik kloramfenikol (polar) (Pratama et al., 2007). Karbondioksida dapat juga difungsikan sebagai pembawa komponen aroma serta mampu menahan komponen aroma di dalam produk, misalnya aroma yang ditambahkan ke dalam beras giling akan menghasilkan beras dengan aroma yang diinginkan (Pratama, 2000). Hal ini karena CO_2 superkritis mudah berdifusi dalam material dan melarut dalam komponen aroma yang bersifat nonpolar. Karbon dioksida bertekanan tinggi menyebabkan kerusakan membran sel (Guo et al., 2011). Karbon dioksida superkritis memiliki difusifitas tinggi sehingga mudah berpenetrasi ke dalam materi mikroporous. Di dalam sel, karbon dioksida superkritis akan menembus membran sel yang tersusun dari senyawa fosfolipid dan protein yang membentuk lapisan hidrofobik, larut dalam fosfolipid, dan mengakibatkan permeabilitas selektif membran terganggu. Disamping karena difusi, kerusakan membran juga disebabkan oleh tekanan tinggi. Difusi yang terus menerus menyebabkan akumulasi CO_2 di dalam membran sitoplasma dan dapat mengakibatkan sel pecah (*bursting*) karena tekanan tinggi.

Prinsip dan Mekanisme Pengolahan CO₂ Superkritis

Fenomena apa pun dalam kesetimbangan (reaksi kimia, fase transisi, perubahan konfigurasi molekul) yang disertai dengan penurunan volume, dapat diperbaiki oleh tekanan. Dengan demikian teknologi tekanan tinggi (*High pressure technology/HPT*) berpengaruh terhadap setiap fenomena dalam sistem pangan yang melibatkan perubahan volume, dan perubahan dalam system pangan tersebut mendukung fenomena yang mengakibatkan penurunan volume. HPT berpengaruh terhadap ikatan non-kovalen (ikatan hidrogen, ikatan hidrofobik) secara substansial karena beberapa ikatan non-kovalen sangat sensitif terhadap tekanan, yang berarti komponen makanan dengan berat molekul rendah yang bertanggung jawab terhadap karakteristik gizi dan sensorik tidak terpengaruh, sedangkan komponen makanan dengan berat molekul tinggi yang struktur tersiernya adalah berperan penting untuk penentuan fungsi pangan, adalah sensitif terhadap tekanan. Beberapa ikatan kovalen tertentu mengalami modifikasi oleh tekanan.

Teknologi tekanan tinggi bertindak secara instan dan seragam menembus ke seluruh masa makanan, dan tidak tergantung pada ukuran, bentuk, dan komposisi makanan. Kompresi/penekanan secara seragam akan meningkatkan suhu makanan sekitar 3°C setiap tekanan 100 MPa. Suhu dalam makanan yang bersifat homogen akan meningkat secara seragam karena kompresi/penekanan. Suatu peningkatan suhu makanan di atas suhu ruang dan pada suhu sedikit lebih rendah dari suhu kamar akan meningkatkan inaktivasi tingkat mikroorganisme selama perlakuan HPT. Temperatur pada kisaran 45°C hingga 50°C tampak meningkatkan laju inaktivasi mikroba patogen dan pembusuk makanan. Suhu pada kisaran 90°C hingga 110°C dengan tekanan 500 hingga 700MPa telah digunakan untuk menginaktivasi bakteri pembentuk spora seperti *Clostridium botulinum*.

Daftar Pustaka

- Beckman, E.J. (2004). Supercritical and near-critical CO₂ in green chemical synthesis and processing. *J. Supercrit Fluid.* 28 : 121 – 191.
- Besbes N, Joffraud Jean-J, Khemis IB, Sadok S. (2017), Bio-preservation of refrigerated peeled shrimp (*Parapenaeus longirostris*) using cactus fruit peels polyphenolic extract, Doi: 10.9790/264X-03033647.
- Calvo,L. dan Torres, E. (2010). Microbial inactivation of paprika using high – pressure CO₂. *Journal of Supercritical Fluids.* 52 (1) : 134 – 141.
- Ferrentino,G., dan Spilimbergo, S. (2011). High pressure CO₂ pasteurization of solid food : Current knowledge and future outlooks. *Trends in Food Science and Technology.* 22 : 427 – 441.
- Guo, J., Wu, Y., Xu, G., Xiao, M., Zhang, Y., Chen. (2011). Effects on microbial inactivation and quality attributes in frozen lychee juice treated by supercritical carbon dioxide. *European Food Research Technology*, vol. 232, p. 803-811.
- Higuera-Ciapara, I., Toledo-Guillen, A. R., Noriega-Orozco, L., Martinez-Robinson, K. G., & Esquade-Valle, M. C. (2005). Production of a Low-Cholesterol Shrimp Using Supercritical Extraction. *Journal of Food Process Engineering*, 28(5), 526–538. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2005.00038.x>
- Kadam PS, Jadhav BA, Salve RV and Machewad GM. (2012). Review on the High Pressure Technology (HPT) for Food Preservation. *J Food Process Tech* 3(1): 1-5.
- Kustyawati, M.E., Pratama,F., Saputra,D., Wijaya,A. (2014). Modifikasi warna, tekstur dan aroma tempe setelah diproses dengan karbon dioksida superkritik. *J.Teknol. dan Industri Pangan.* 25 (2) : 168 – 175.
- Labouteur L, Ollero M, and Touboul D. (2015). Lipidomics by supercritical fluid chromatography, *International Journal Molecules Sci.*16(6):13868-13884.
- Liao, H., Zhang, L., Hu, X., Liao, X. (2010). Effect of high pressure CO₂ and mild heat processing on natural microorganisms in apple juice. *Int J Food Microbiol.* 137 : 81 – 87.

- Mathias,O., Kablan,T., Joseph,A. (2010). Inactivation of *Bacillus Substilis* spores with pressurized CO₂ and influence of O₂, N₂O and CH₂CH₂OH on its sporicidal activity. *European Journal of Scientific Research*. 40 (1) : 6 – 14.
- Pratama, F., Saputra, D., Yuliati, K. (2007). Metode pencucian udang segar yang mengandung kloramfenikol dengan menggunakan karbon dioksida fase superkritik. Paten ID 0020002 (29-10-2007). Fata Granted Paten Lembaga Penelitian Universitas Sriwijaya, Palembang.
- Valverde, M.T., Marin-Iniesta, F., Calvo, L. (2010). Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in conference pear with high pressure carbon dioxide and effects on pear quality. *J Food Eng.* 98 : 421 – 480.

BAB 3. PERUBAHAN NILAI PROKSIMAT UDANG

Pendahuluan

Pengolahan dengan CO₂ superkritis dan subkritis menghasilkan perubahan yang signifikan terhadap kadar proksimat bahan pangan meliputi kadar protein, lemak, air dan karbohidrat *by different*. Pada daerah superkritis, CO₂ superkritis (sc CO₂) memiliki kelarutan yang tinggi, dimana densitas sc CO₂ meningkat dengan meningkatnya tekanan, sehingga kolesterol yang terekstraksi lebih banyak (Nautiyal, 2016). Daerah superkritis dan subkritis dijelaskan pada Bab 2. Di wilayah subkritis sedikit di bawah titik kritis, CO₂ dapat berupa cairan yang lebih polar. Di bawah titik kritis dan di atas titik tripel -56,6°C dan 0,52 MPa, CO₂ berada sebagai zat cair. Udang memiliki nilai gizi tinggi dan berfungsi penting bagi kesehatan manusia. Udang mengandung senyawa bioaktif seperti omega-3, mineral, lemak, kitin, karotenoid (astaxantin) serta vitamin, sumber makanan yang kaya asam amino. Di dalam bahan pangan zat gizi makro dan mikro tidak berdiri sendiri melainkan saling berdampingan dan berkaitan, misalnya pada daging, selain terkandung protein juga lemak dan karbohidrat serta beberapa mikro nutrient lainnya seperti vitamin dan mineral. Komposisi kandungan proksimat udang disajikan pada Tabel 3. Pada pengolahan maupun proses penanganan yang kurang efektif dapat menyebabkan kerusakan pada produk pangan berbasis protein. Pengolahan udang dengan penyimpanan beku menghasilkan perubahan perubahan pada komponen gizinya, seperti terlihat pada Tabel 4. Kadar protein cenderung menurun selama penyimpanan dan jika terjadi kenaikan seperti pada bulan ke 2, terlihat diikuti oleh penurunan kadar air (2,46%), sehingga kenaikan protein diduga ada hubungannya antara persentase kadar air dengan persentase kadar protein. Penurunan protein udang selama penyimpanan seperti terlihat pada Tabel 4 dapat disebabkan oleh beberapa hal antara lain: (Slavin, 1968 yang disitir oleh Nurdjanah et al., 2006).

1. Terjadinya pemekatan konsentrasi garam terutama garam garam anorganik yang keluar bersama air pada waktu pembekuan dan penyimpanan di bawah suhu 0°C.
2. Hidrolisa lemak yang menyebabkan selama penyimpanan beku kandungan asam lemak bebas akan bertambah yang diikuti dengan kerusakan protein (Slavin, 1968).

Tabel 3. Nilai gizi udang per 100 g daging udang yang bisa dimakan.

| Komponen Senyawa | Nilai |
|---------------------------|--------------|
| Nutrisi | |
| Protein (g) | 19,4±0,56 |
| Lipid (g) | 1,15±0,19 |
| Air (g) | 76,3±0,57 |
| Energi | 89,0±0,12 |
| Asam amino esensial (mg): | |
| Isoleusin | 930,7±8,10 |
| Leusin | 1463,9±22,30 |
| Lysine | 1480,1±27,57 |
| Methionin+sistein | 668,1±16,57 |
| Phenilalanin + tirosin | 1389,2±19,27 |
| Threonin | 756,0±8,89 |
| Tryptofan | 223,3±2,90 |
| Valine | |
| Komposisi lipid: | |
| ΣSFA (mg) | 935,7±5,89 |
| ΣMUFA (mg) | 257, ± 3,71 |
| ΣPUFA (mg) | 163,5±7,90 |
| Eicosapentaenoik (mg) | 321,0±5,23 |
| Docosahexanoik (mg) | 112,0±3,02 |
| Σn-3PUFA (mg) | 75,3±1,43 |
| Σn-6PUFA (mg) | 204,5±2,25 |
| n-6/n-3PUFA | 106,0±2,31 |
| PUFA/SFA | 0,5±0,01 |
| Kolesterol | 1,3±0,05 |
| Mineral (mg): | |
| Calsium | 107,3 1,96 |
| Magnesium | 58,5±1,38 |
| Fosfor | 303,4±3,22 |
| Potassium | 259,6±3,25 |
| Sodium | 176,1±3,04 |
| Mineral mikro (ug): | |
| Copper | 918±4,62 |
| Iron | 2196,5±16,01 |
| Manganese | 50,5±1,64 |
| Selenium | 44±1,06 |
| Zat besi | 1403,5±5,43 |

Sumber: Dayal et al. (2013)

Denaturasi protein juga dapat mengakibatkan penurunan kelarutan perubahan kapasitas penahan air (WHC) dan terbukanya ikatan peptide sehingga lebih mudah dihidrolisa oleh enzim. Protein yang telah terdenaturasi dan keluar sewaktu thawing akan mengakibatkan kehilangan cairan dari produk menjadi lebih besar. Denaturasi menyebabkan daya ikat protein terhadap air menjadi berkurang sehingga air mudah meguap dan keluar dari jaringan tubuh udang. Kecepatan denaturasi protein tergantung pada tinggi rendahnya suhu dan juga dipengaruhi lama penyimpanan dalam cold storage.

Penurunan kadar lemak udang selama pengolahan dapat terjadi kemungkinan adanya hubungan antara hidrolisa lemak dan denaturasi aktomiosin. Hubungan ini menyebabkan bertambahnya jumlah asam lemak bebas dan berkurangnya aktomiosin. Akumulasi dari asam lemak bebas seperti linolenat dan linoleat secara cepat mengurangi kelarutan dari aktomiosin pada suhu 0°C. Kadar abu udang selama proses pengolahan mempunyai hubungan dengan drip pada udang beku pada saat thawing (pelelehan). Selama proses thawing terjadi kelarutan beberapa unsur mineral dan garam yang larut dalam air.

Asam amino sebagai penyusun protein dalam semua makhluk hidup baik tingkat rendah maupun tinggi dengan fungsi sebagai katalisator, pengangkut, dan penyimpan molekul lain (Katili, 2009). Asam amino yang umumnya terdapat pada udang adalah asam glutamat, asam aspartat, arginin, lisin, leusin, glisin dan alanin. Asam amino ini pada umumnya akan mengalami perubahan selama penyimpanan udang. Selama penyimpanan beku asam amino mengalami penurunan yang disebabkan oleh denaturasi protein dan drip sewaktu dilakukan thawing. Perubahan kadar asam amino udang selama penyimpanan beku disajikan pada Tabel 6. Beberapa reaksi fisik dan kimiawi yang dapat terjadi selama penyimpanan beku juga dapat menyebabkan perubahan perubahan pada komponen gizi udang. Reaksi reaksi tersebut meliputi polimerisasi, agregasi, komplekasi, dan denaturasi serta interaksi dengan komponen yang lain seperti lemak. Reaksi reaksi tersebut dikontrol oleh suhu, pH, dan a_w .

Pengolahan udang menggunakan superkritis CO₂ dan subkritis CO₂ menghasilkan perubahan komponen proksimat udang. Perubahan ini meliputi penurunan maupun kenaikan makromolekul komponen gizi yang disebabkan oleh sifat polaritas molekul.

Misalnya molekul lemak yang bersifat non polar lebih mudah terekstraksi oleh proses pengolahan teknologi CO₂ bertekanan tinggi yang bersifat non polar.

Tabel 4. Nilai proksimat udang beku selama penyimpanan beku.

| Lama simpan (bulan) | Protein (%) BB | Lemak (%) BB | Abu (%) BB | Air (%) |
|---------------------|----------------|--------------|------------|---------|
| Kontrol | 19,46 | 0,25 | 1,06 | 80,45 |
| 1bl | 18,37 | 0,17 | 1,44 | 78,56 |
| 2bl | 22,92 | 2,42 | 1,37 | 77,99 |
| 3bl | 18,82 | 1,06 | 0,86 | 79,22 |
| 4bl | 18,93 | 1,12 | 0,70 | 79,59 |
| 5bl | 18,91 | 1,19 | 1,01 | 79,35 |
| 6bl | 17,19 | 0,94 | 0,94 | 79,77 |

Sumber: Nurdjanah et al. (2006)

Sementara kandungan protein yang rendah dapat disebabkan kelarutannya dalam superkritis CO₂. Molekul protein yang tersusun oleh asam amino, bisa bersifat polar dan berakibat tidak mudah terekstraksi oleh pengolahan CO₂ bertekanan tinggi apabila molekul asam amino bersifat polar dan demikian sebaliknya, jika asam amino bersifat hidrofobik maka akan mudah terekstraksi. Perubahan kadar proksimat udang yang diolah menggunakan CO₂ bertekanan tinggi dipaparkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Efek pengolahan CO₂ bertekanan tinggi terhadap kadar proksimat udang

| Tekanan (psi) / waktu tekan (menit) | Kadar air (%) | Lemak (%) BK | Protein (%) BK | Abu (%) BK |
|-------------------------------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|
| 900 / 5 | 79.99 ± 0.71a | 0.36±0.005a | 16.04 ± 0.08f | 0.70 ± 0.03a |
| 900 / 10 | 79.84 ±0.14a | 0.38±0.01a | 18.11 ± 0.13hi | 0.99 ± 0.1ab |
| 900 /15 | 79.97 ±0.1a | 0.28±0.03a | 16.75 ± 0.12a | 0.99 ± 0.1b |
| 950 /5 | 77.21 ±1.48a | 0.28±0.007a | 18.20 ± 0.14hi | 1.06 ± 0.3c |
| 950 /10 | 78.48 ±1.06a | 0.24±0.42a | 18.15 ± 0.18bcd | 1.54 ± 0.3cd |
| 950 /15 | 78.29 ±1.84ab | 0.60±0.45a | 16.78 ± 0.34ab | 0.81 ± 0.12cd |
| 1100 /5 | 77.9 ±1.27ab | 0.78±0.45a | 18.45 ± 0.28de | 1.28 ± 0.78cd |
| 1100 /10 | 74.96 ± 0.6ab | 0.78±0.53a | 18.94 ± 0.13fg | 1.52 ± 0.5cd |
| 1100 /15 | 74.38 ±1.42bc | 0.77±0.046a | 18.21 ± 0.14bc | 1.03 ± 0.04d |
| Kontrol | 79.08 ± 1.36c | 0.29±0.021a | 18.09 ± 0.68h | 0.96 ± 0.1e |

Nilai rata-rata diikuti dengan huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda secara signifikan ($p \leq 0.05$). Sumber: Kustyawati et al. (2021)

Tabel 6. Komposisi asam amino dan persentase asam amino esensial udang Windu

| Jenis asam amino | Kadar (g/100g protein) selama penyimpanan (bulan) | | | | | | | |
|------------------|---|-----|------|-----|------|----|------|----|
| | 0 bl | SK | 1bl | SK | 2bl | SK | 3bl | SK |
| Esensial: | | | | | | | | |
| Isoleusin | 3,85 | 96 | 3,48 | 87 | 1,88 | 47 | 2,08 | 52 |
| Leusin | 4,32 | 62 | 4,85 | 69 | 3,19 | 46 | 3,67 | 52 |
| Lisin | 5,31 | 97 | 7,49 | 100 | 4,10 | 75 | 4,87 | 89 |
| Metionin | 3,74 | 100 | 2,38 | 68 | 1,79 | 51 | 1,97 | 56 |
| Tirosin | 2,70 | | 3,09 | | 1,40 | | 1,65 | |
| Fenilalanin | 3,81 | 100 | 3,39 | 100 | 1,96 | 56 | 2,25 | 64 |
| Treonin | 4,33 | 100 | 2,78 | 70 | 1,92 | 48 | 2,35 | 59 |
| Valin | 4,99 | 100 | 3,94 | 79 | 1,96 | 39 | 2,41 | 48 |
| Non esensial : | | | | | | | | |
| Histidin | 1,63 | | 2,24 | | 1,00 | | 1,41 | |
| Arginine | 5,07 | | 6,19 | | 3,62 | | 3,77 | |
| Asam aspartate | 10,67 | | 8,84 | | 4,49 | | 5,48 | |
| Serin | 3,52 | | 2,78 | | 1,16 | | 2,04 | |
| Asam glutamate | 12,45 | | 7,76 | | 9,21 | | 9,58 | |
| Glisin | 5,52 | | 5,96 | | 2,71 | | 3,50 | |
| Alanine | 3,46 | | 2,76 | | 2,57 | | 3,31 | |

| Jenis asam amino | Konsentrasi (g/100g protein) selama penyimpanan beku | | | | | |
|------------------|--|----|------|----|------|----|
| | 4 bl | SK | 5bl | SK | 6bl | SK |
| Esensial: | | | | | | |
| Isoleusin | 1,41 | 35 | 0,16 | 4 | 0,52 | 13 |
| Leusin | 1,96 | 28 | 0,18 | 3 | 0,71 | 10 |
| Lisin | 2,99 | 54 | 0,28 | 5 | 1,32 | 24 |
| Metionin | 1,36 | 39 | 0,15 | 4 | 0,48 | 14 |
| Tirosin | 1,48 | - | 0,10 | - | 0,61 | - |
| Fenilalanin | 1,84 | 56 | 0,22 | 6 | 0,56 | 19 |
| Treonin | 1,31 | 33 | 0,18 | 5 | 0,41 | 10 |
| Valin | 2,46 | 49 | 0,11 | 2 | 0,55 | 11 |
| Non esensial : | | | | | | |
| Histidin | 0,94 | - | 0,12 | - | 0,64 | - |
| Arginine | 2,39 | | 0,29 | | 0,94 | |
| Asam aspartate | 3,20 | | 0,37 | | 0,90 | |
| Serin | 1,31 | | 0,15 | | 0,47 | |
| Asam glutamate | 3,72 | | 0,35 | | 1,01 | |
| Glisin | 1,72 | | 0,21 | | 0,55 | |
| Alanine | 1,78 | | 0,17 | | 0,47 | |

Keterangan:

SK lebih dari 100 ditulis 100 (Muchtadi, 1989 dalam Nurdjanah et al., 2006).

SK = skor kimia, dihitung dengan pola FAO (1973) sebagai referensi.

Sumber: Nurdjanah et al. (2006)

Menurunnya kadar protein pada bahan disebabkan oleh denaturasi protein yang mengakibatkan protein menggumpal dan kelarutannya menurun. Karbon dioksida berinteraksi dengan gugus samping polipeptida hidrofilik melalui ikatan ionik dan dengan komponen hidrofobik di bagian dalam struktur protein, tetapi tidak merusak ikatan hidrogen di dalam susunan α - helix dan β -sheet struktur sekunder. Hal ini mengakibatkan struktur protein terbentang dan mudah membentuk gumpalan. Bentuk struktur terbentang menyebabkan protein membentuk agregat dan tidak larut dalam air. Hal ini terjadi pada tempe tekanan 7,6 MPa (1100 psi) waktu 5 menit. Pourmortazavi (2018) melaporkan bahwa CO₂ tekanan tinggi merusak struktur tersier protein tetapi meningkatkan kestabilan struktur sekunder yang terdiri dari susunan α - helix-DNA dan β -sheet dan ikatan peptida dalam struktur primer. Udang menjadi sumber asam amino pangan karena kandungan protein yang tinggi. Pengolahan dengan pengeringan oven maupun matahari mengakibatkan penurunan protein yang signifikan ($p < 0,05$) (Akonor et al., 2016). Kehilangan protein ini sangat mungkin berkaitan dengan denaturasi dan atau reaksi kecoklatan (*browning*) karena dalam reaksi ini melibatkan asam amino.

CO₂ superkritis pada 1100 psi dapat menarik molekul air dengan mengikat air dan membentuk ion HCO₃⁻ dan akibatnya mengurangi kadar air pada udang. Penurunan kadar air dapat menyebabkan peningkatan relatif pada protein, lemak, dan abu. Kadar abu udang yang diberi perlakuan 1100 psi meningkat signifikan ($p \leq 0,05$) dibandingkan sampel lainnya. Lemak pada makanan bersifat lipofilik, sangat larut dalam superkritis CO₂, sehingga seharusnya mengalami penurunan selama proses HPCD pada penelitian ini. Pada tekanan dan suhu tinggi, densitas meningkat dan kelarutan juga meningkat. Namun, peningkatan suhu dalam sistem dapat menurunkan massa jenis dan kelarutan pelarut sekaligus meningkatkan tekanan uap zat terlarut. Akibatnya, penetrasi CO₂ superkritis berkurang dan kelarutan lemak menjadi sangat kecil.

Warna Udang

Nilai pasar udang ditentukan oleh penilaian visual terhadap keseluruhan warna badan udang dan hal ini berkaitan dengan kandungan karotenoid (astaxantin) yang menghasilkan warna orange merah pada daging udang. Warna hewan air berasal dari

senyawa alami seperti klorofil, porfirin, dan karotenoid (Erti et al., 2013). Warna udang sangat tergantung pada jumlah pigmen (terutama astaxanthin) yang terdapat pada bagian exoskeleton dan lapisan epidermis. Pigmentasi pada udang dipengaruhi oleh interaksi dari beberapa faktor, diantaranya yaitu pakan, warna dasar udang, kondisi stres, suhu, logam berat (terutama tembaga) dan genetik (Martinez et al., 2014; Wade et al., 2015; Rodriguez et al., 2017). Konsentrasi astaxanthin mengontrol warna udang dan menghindari kerusakan akibat kelebihan paparan cahaya. Degradasi astaxanthin dan perubahan warna pada udang dipengaruhi juga oleh faktor suhu. Warna kemerahan pada udang biasanya terjadi karena efek termal atau tekanan hipoksia, tetapi efek tersebut dapat dibalik (*reversed*) ketika tekanan dihilangkan. Udang yang terpapar logam berat (tembaga) dalam jumlah yang tinggi telah dilaporkan memiliki warna yang lebih merah (Martinez et al., 2014), dan hal ini mengindikasikan bahwa tidak selalu udang yang berwarna itu lebih sehat daripada udang pucat. Pada udang yang dimasak terjadi interaksi antara crustacyanin (astaxanthin bebas pada udang yang terikat dalam protein multimerik) dan astaxanthin terganggu, yang menyebabkan perbedaan warna merah pada udang masak. Direkomendasikan bahwa udang saat dipanen dibiarkan hidup sebelum dimasak, dan penggunaan air garam sangat baik dalam menjaga warna dan rasa udang.

Penilaian warna daging udang merujuk pada nilai indeks Kecerahan (*Lightness *L*), dimana jika nilai **L* menurun mengindikasikan bahwa daging udang berwarna gelap. Perubahan atribut warna udang dapat dilihat pada Tabel 7. Warna gelap ini dapat terjadi oleh adanya reaksi browning Maillard yang berlangsung selama proses pengolahan menggunakan panas. Pembentukan warna merah pada daging udang yang terpapar panas adalah sebagai hasil dari pembebasan karotenoid udang astaxanthin ketika karotenoidprotein terdegradasi selama proses denaturasi protein (proteinkarotenoid terdegradasi menjadi karotenoid dan protein). Konsentrasi karotenoid udang juga akan meningkat dan menghasilkan warna pada saat terjadi pengurangan kadar air. Warna kekuningan udang juga dihasilkan oleh reaksi browning Maillard. Udang yang dipapar pengeringan baik pengeringan oven maupun matahari menghasilkan peningkatan warna merah (**a*) yang signifikan ($p > 0.05$) dibandingkan warna daging udang segar (Akonor et al., 2016). Eksoskeleton atau kulit terluar udang yang memiliki tekstur keras ini mengandung

karotenoid yang disebut sebagai astaxanthin. Karotenoid sendiri adalah bagian dari pigmen pewarnaan. Karotenoid pulalah yang memberi warna daging salmon menjadi berwarna pink. Sebelum dimasak, astaxanthin yang ada di kulit terluar udang masih terlindung dengan rantai protein yang disebut crustacyanin. Namun panas akan mengurai ikatan rantai protein ini. Hasilnya karotenoid dalam ikatan rantai protein ini akan melepaskan astaxanthin. Astaxanthin ini akan membuat daging udang berubah warna jadi kemerahan. Astaxanthin adalah komponen dalam jenis algae dimana algae tersebut dimakan oleh udang sehingga udang menjadi sumber astaxanthin sebagai antioksidan bagi manusia. Astaxanthin membantu menjaga inflamasi jantung dengan cara mencegah timbulnya radikal bebas dalam sel. Oleh karena itu, udang digolongkan sebagai makanan sehat dan berperan dalam kesehatan manusia. Namun demikian ada beberapa orang yang mengalami alergi terhadap udang. Senyawa dalam udang yang dapat memicu timbulnya alergi adalah tropomiosin, yaitu protein yang ditemukan di dalam udang. Protein lain dalam udang yang memicu timbulnya alergi adalah arginin kinase dan hemosianin.

Tabel 7. Pengaruh perlakuan waktu dan tekanan pada atribut warna udang putih

| Tekanan (psi)/ Waktu (menit) | Warna | | | | |
|---------------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | ΔL^* | a^* | b^* | <i>Chrome</i> | <i>Hue</i> |
| Kontrol | 51.55 ± 0.77a | 4.15 ± 0.07a | 4.65 ± 0.49c | 4.0 ± 0.92a | 20.2 ± 2.05a |
| 900/5 | 51.65 ± 0.77a | 5.55 ± 1.62bc | 7.6 ± 1.55e | 7.5 ± 0.85c | 45.7 ± 0.78cd |
| 900/10 | 54.15 ± 1.10ab | 5.15 ± 0.49ab | 4.5 ± 0.71c | 9.0 ± 1.48e | 45.6 ± 1.2cd |
| 900/15 | 59.1 ± 2.96cd | 5.25 ± 2.05b | 8.0 ± 2.12ef | 8.8 ± 1.48de | 45.8 ± 11.8cd |
| 950/5 | 53.75 ± 0.71ab | 5.0 ± 0.71ab | 9.55 ± 0.21g | 8.9 ± 0.07de | 45.2 ± 8.91cd |
| 950/10 | 52.05 ± 1.34a | 4.05 ± 0.07a | 2.05 ± 0.35a | 4.7 ± 0.28ab | 36.4 ± 4.31b |
| 950/15 | 54.9 ± 6.64ab | 5.6 ± 0.14bc | 8.75 ± 0.21f | 9.1 ± 0.35e | 56.8 ± 0.49d |
| 1100/5 | 59.75 ± 4.45c | 5.25 ± 0.91b | 3.85 ± 1.34b | 6.5 ± 0.28b | 43.2 ± 2.19c |
| 1100/10 | 56.75 ± 3.88bc | 5.85 ± 1.20c | 6.65 ± 1.76d | 6.6 ± 0.35b | 45.1 ± 3.61cd |
| 1100/15 | 61.35 ± 0.21c | 6.1 ± 0.71c | 7.75 ± 2.19ef | 8.1 ± 0.64d | 48.1 ± 2.47cd |

Huruf berbeda pada kolom yang sama mengindikasikan perbedaan signifikan ($p \leq 0.05$) antar perlakuan. Hasil merepresentasikan rata-rata dari 3 kali ulangan dan standar deviasi.

Sumber: Kustyawati et al. (2021)

Daftar Pustaka

- Akonor P. T. H. Ofori, N. T. Dziedzoave, and N. K. Kortei. (2016). Drying Characteristics and Physical and Nutritional Properties of Shrimp Meat as Affected by Different Traditional Drying Techniques. *International Journal of Food Science*, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7879097>
- Dayal, S. J., Ponniah. G. A., Imran Khan. H., Madhu Babu. P. E., Ambasankar. K., Kumarguru Vasagam. P. K. (2013). Shrimps – a nutritional perspective, *Current Science*, 104(11): 1487-1495.
- Erti, N.G., Elizur, A., Brooks, P., Kuballa, A.V., Anderson, T.A., Knibb, W.R. (2013). Molecular characterization of color formation in the prawn *Fenneropenaeus merguensis*. *PLoS One*, 8: e56920.
- Katili, S. A. (2009). Struktur dan Fungsi Protein Kalogen. *Jurnal pelangi ilmu*, 5: (19-27).
- Kustyawati et al, (2021). Quality and shelf-life of white shrimp ((*Litopenaeus vannamei*) processed high pressure carbon dioxide (HPCD) at subcritical and supercritical state. *J. of Food Quality*, in process of publication
- Martínez, A., Romero, Y., Castillo, T., Mascaro, M., López-Rull, I. (2014). The effect of copper on the color of shrimps: redder is not always healthier. *PLoS ONE*, 9: e107673.
- Nautiyal, O. H. (2016). Review Article Food Processing by Supercritical Carbon Dioxide-Review. *EC Chemistry*, 2(1), 111–135.
- Nurdjanah, W., Trilaksana, A., Hidayat dan Danil, M. (2006). Pengaruh lama penyimpanan beku terhadap nilai gizi protein udang windu (*Penaeus monodon*). *Buletin Teknologi Hasil Perikanan*, 2(1):24-30.
- Pourmortazavi, S. M., Saghafi, Z., Ehsani, A., & Yousefi, M. (2018). Application of supercritical fluids in cholesterol extraction from foodstuffs: a review. *Journal of Food Science and Technology*, Vol. 55, pp. 2813–2823. Springer. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3205-z>
- Rodríguez, B.C.E., García, A.C., Ponce-Palafox, J.T., Spanopoulos-Hernández, M., Puga-López, D., Arrendono-Figueroa, J.L., Cardenaz, L.M. (2017). The Color of Marine Shrimps and Its Role in the Aquaculture. *Int J Aquac Fish Sci*, 3(3): 062-065

- Wade, N.M., Budd, A., Irvin, S., Glencross, B.D. (2015). The combined effects of diet, environment and genetics on pigmentation in the Giant Tiger Prawn, *Penaeus monodon*. *Aquaculture*, 449: 78-86.
- Wade, N.M., Paulo, C., Goodall, J., Fischer, M., Poole, S. (2014). Quantitative methods to measure pigmentation variation in farmed Giant Tiger Prawns, *Penaeus monodon*, and the effects of different harvest methods on cooked color. *Aquaculture*, 433: 513-519.

BAB 4. MELANOSIS PADA UDANG

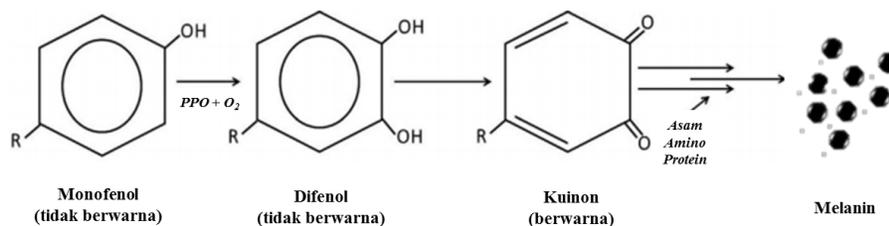
Pendahuluan

Proses kemunduran mutu udang dapat disebabkan oleh adanya reaksi autolisis yaitu dapat dipengaruhi oleh adanya aktivitas enzim, aktivitas bakteri, dan reaksi kimiawi pada saat penyimpanan. Salah satu kerusakan khas yang dapat terjadi pada udang adalah timbulnya bintik atau pigmen hitam (*black spot*) yang dikenal dengan melanosis. Melanosis sebagai masalah yang paling umum pada udang dan dapat terbentuk beberapa jam setelah udang dipanen ketika bersentuhan langsung dengan oksigen baik selama penyimpanan pasca panen di dalam es atau di ruang dingin. Fenomena melanosis tidak dapat dihentikan namun lajunya dapat diperlambat dengan penyimpanan dingin dan tetap berlangsung walaupun pada penyimpanan beku. Melanosis umumnya bermula pada karapas bagian cephalotoraks, diikuti penyebaran pada bagian abdominal, pereopod, pleopod dan telson. Misalnya, udang *Parapenaeus longirostris* melanosis bermula pada bagian kepala, selanjutnya ke bagian ekor, kaki dan menyebar sempurna ketika terjadi di bagian punggung. Kecepatan penyebaran *black spot* ini selain dipengaruhi oleh jenis atau spesies udang, penanganan yang diberikan, dan suhu lingkungan, juga dipengaruhi oleh keberadaan enzim polifenoloksidasi pada tubuh udang. Misalnya *black spot* udang vaname (*L. vannamei*) muncul pada bagian chepalothorax setelah 48 jam penyimpanan suhu dingin 4°C (Utari, 2014). *Black spot* terjadi lebih cepat pada bagian bagian tubuh udang yang berdekatan dengan organ pencernaan, sehingga bagian tersebut mudah mengalami pembusukan. Ilustrasi melanosis pada udang disajikan pada Gambar 4, tanda panah hitam menunjukkan *black spot*. Bintik hitam pada udang beku muncul setelah udang dilakukan thawing atau pencairan. Selama pembekuan enzim yang bertanggung jawab untuk melanosis menjadi tidak aktif, namun setelah dicairkan, enzim yang berada di kelenjar pencernaan ini mudah dilepaskan dan menjadi aktif karena ada peningkatan suhu, dan jika substratnya memadai melanosis dapat berkembang dengan cepat (Nirmal & Benjakul 2010).



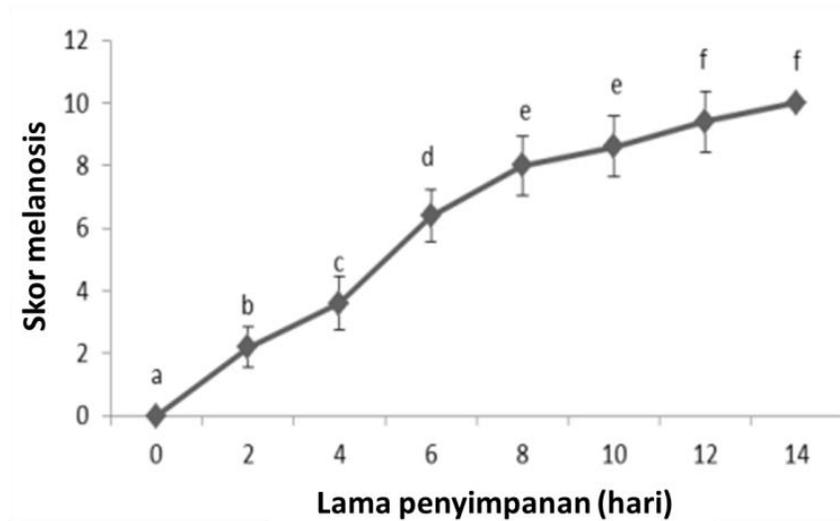
Gambar 4. *Black spot* pada telson dan karapas udang
Sumber: Goncalves & de Oliveira (2016)

Melanosis adalah suatu proses post-mortem alami, dimana polimerisasi fenol menjadi pigmen hitam molekul tinggi yang tidak dapat larut, yaitu melanin. Melanosis muncul akibat oksidasi enzimatik dari fenol oleh enzim polifenoloksidase (PPO) menjadi kuinon. Polimerisasi dari kuinon selanjutnya menghasilkan pigmen berwarna gelap, melanin, yang tidak dapat larut (Nirmal & Benjakul, 2011; Whitaker et al., 2003). Terdapat dua jenis aktivitas dari PPO, yaitu yang pertama aktivitas dari monofenol oksidase dan yang kedua adalah *o*-difenol oksidase. Reaksi ini terjadi secara alami dan dimulai oleh enzim PPO, karena adanya keberadaan oksigen, PPO mengubah monofenol yang tidak berwarna menjadi difenol. Difenol selanjutnya diubah menjadi kuinon (yang berwarna) dan bereaksi dengan asam amino membentuk polimer coklat kompleks. Kuinon bereaksi dengan oksigen yang selanjutnya mengalami oksidasi lebih lanjut menghasilkan polimer tak larut dengan berat molekul tinggi dan pigmen hitam yang disebut dengan melanin. Melanin yang dihasilkan merupakan substansi yang bertanggung jawab pada fenomena pembentukan bintik warna hitam pada udang maupun crustacea lainnya, atau yang disebut dengan melanosis (Garcia-Carreno et al., 2008; Amparyup et al., 2013). Reaksi dari melanosis disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Reaksi black spot pada udang
Sumber: Goncalves & de Oliveira (2016)

Bintik hitam yang terbentuk dari fenomena melanosis berdampak pada sifat sensori pada udang yang berujung pada penerimaan dari konsumen. Walaupun tidak berbahaya namun ini merupakan salah satu masalah utama industri karena menyebabkan perubahan yang menurunkan karakteristik sensori maupun penerimaan dari segi warna (Senapati et al., 2017). Pengukuran melanosis dapat dilakukan secara sensori maupun indeks *browning*. Secara sensori pengukuran melanosis dilakukan oleh panelis terlatih menggunakan skoring 0-10 poin dengan mengamati persentase penyebaran melanosis pada tubuh udang. Semakin tinggi skornya maka semakin parah melanosis yang terjadi. Perhitungan indeks *browning* membutuhkan pengukuran warna terang/*lightness* (L^*), kemerahan/*redness* (a^*), dan kekuningan/*yellowness* (b^*), warna coklat merupakan kombinasi dari parameter warna L^* , a^* , dan b^* , sehingga indeks *browning* mengindikasikan warna coklat murni yang terbentuk akibat aktivitas enzim polifenoloksidase pada substratnya. Pengamatan skor melanosis pada udang vaname pada penyimpanan dingin disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Skor melanosis udang vaname selama penyimpanan dingin
Sumber: Senapati et al. (2017)

Melanosis pada Pengolahan *High Pressure CO₂*

Polifenol oksidase dalam bentuk ekstrak enzim kasar tidak mudah diinaktivasi oleh perlakuan superkritis CO_2 pada tekanan 20–25 MPa dan suhu $37^\circ C$ for 10 menit dibandingkan dalam bentuk *in vivo*. Kelarutan CO_2 dalam media air relatif rendah. CO_2

terlarut dapat menurunkan pH media; namun, adanya garam dalam media buffer bisa memberikan efek buffer. Kontak langsung CO₂ dengan udang bisa menginduksi inaktivasi enzim lebih efisien karena terjadi kontak yang lebih baik antara enzim dan CO₂. Larutan berair dapat bertindak sebagai penghalang untuk interaksi langsung CO₂ pada udang. Dengan demikian, mekanisme inaktivasi enzim bisa jadi berbeda bila CO₂ bersentuhan langsung dengan udang atau ketika CO₂ ditambahkan ke cairan larutan.

Enzim

Berbagai jenis enzim seperti lipase, beberapa fosfatase, dehidrogenase, oksidase, amilase dan lainnya dapat bereaksi dengan CO₂ superkritis (SC CO₂). Stabilitas dan aktivitas enzim yang terpapar dengan karbon dioksida di bawah tekanan tinggi tergantung pada jenis enzim, kadar air dalam larutan, dan pada tekanan dan suhu dari sistem reaksi. Struktur tiga dimensi enzim mungkin dapat berubah secara signifikan dalam kondisi ekstrim, dan menyebabkan enzim terdenaturasi dan konsekuensinya enzim kehilangan aktivitasnya. Jika kondisi pengolahan CO₂ superkritis tidak berakibat merusak maka struktur protein sebagian besar dapat dipertahankan. Perubahan minor terhadap struktur enzim dapat menyebabkan perubahan fase protein aktif dengan mengubah aktivitas, spesifikasi dan stabilitas enzim. Reaksi enzim yang terjadi selama proses superkritis CO₂ adalah sebagai berikut:

1. Reaksi hidrolisis terjadi pada enzim lipase, proteinase, selulase. Hidrolisis enzim tergantung pada besarnya tekanan, suhu, laju kecepatan CO₂ dan kandungan air bahan, banyaknya enzim dalam system dan distribusi enzim di dalam reactor system. Lipase cenderung stabil terhadap perlakuan CO₂ superkritis.
2. Terjadi reaksi sintesis selama proses CO₂ superkritis. Sintesis senyawa biokatalis dapat berlangsung selama proses CO₂ superkritis. Sifat volatilitas CO₂ yang tinggi memudahkan CO₂ sangat mudah dipisahkan secara sempurna dari produk sehingga menghasilkan reaksi tanpa solven. Hal ini sangat menguntungkan jika dimanfaatkan oleh industri pengolahan, kosmetik dan obat-obatan.

Inaktivasi enzim kunci/penghambatan metabolisme sel karena penurunan pH internal, Enzim, yang membentuk sebagian besar protein di dalam sitosol, memiliki aktivitas maksimal pada pH optimal, dan aktivitasnya menurun tajam diluar kondisi optimal. Oleh karena itu, menurunnya pH sitoplasma dapat menyebabkan penghambatan dan/atau inaktivasi enzim kunci yang esensial untuk metabolisme dan proses regulasi, seperti glikolisis, pengangkutan asam amino dan peptida, pengangkutan ion aktif, dan translokasi proton. Beberapa enzim kehilangan aktivitasnya secara signifikan, dan sebagian lain hanya sedikit terpengaruh oleh CO₂ bertekanan. Hal ini karena karena menurunnya pH menyebabkan presipitasi pada enzim yang memiliki pH isoelektrik asam, dan enzim dengan titik isoelektrik basa tidak terpengaruh.

Daftar Pustaka

- Amparyup, P., Charoensapsri, W., & Tassanakajon, A. (2013). Prophenoloxidase system and its role in shrimp immune responses against major pathogens. *Fish & Shellfish Immunology*, 34(4), 990-1001.
- García-Carreno, F. L., Cota, K., & Navarrete Del Toro, M. A. (2008). Phenoloxidase activity of hemocyanin in whiteleg shrimp *Penaeus vannamei*: conversion, characterization of catalytic properties, and role in postmortem melanosis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), 6454-6459.
- Goncalves, A. A., de Oliveira, A. R. M. (2016). Melanosis in crustaceans: A review. *LWT - Food Science and Technology*, 65, 791-799.
- Nirmal, N. P., & Benjakul, S. (2010). Effect of catechin and ferulic acid on melanosis and quality of Pacific white shrimp subjected to prior freezeethawing during refrigerated storage. *Food Control*, 21(9), 1263-1271.
- Senapati, R. S., Kumar, G. P., Singh, C. B., Xavier, K. A. M., Chouksey, M. K., Nayak, B. B., Balange, A.K. (2017). Melanosis and quality attributes of chill stored farm raised whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Journal of Applied and Natural Science*, 9(1), 626-631.

- Utari, S.A. (2014). *Kemunduran mutu udang putih: Organoleptik, blackspot, histologis, dan enzimatis*. Skripsi. Bogor. Institut Pertanian Bogor.
- Whitaker, J. R., Ramírez, E. C., & Virador, V. M. (2003). Polyphenol oxidase. In J. R. Whitaker, A. G. J. Vorgen, & D. W. S. Wong (Eds.), *Handbook of food enzymology*. Marcel Dekker.

BAB 5. TEKSTUR DAGING UDANG

Pendahuluan

Daging udang seperti halnya ikan tersusun dari tiga jenis protein, yaitu protein miofibril, protein sarkoplasma, dan stroma (jaringan ikat). Miofibril merupakan protein struktural dengan fraksi terbesar pada daging, yaitu berkisar dari 44-46%, yang berfungsi dalam kontraksi otot. Protein miofibril merupakan protein yang larut garam dan perannya sangat penting dalam pembentukan gel produk ikan. Protein sarkoplasma merupakan jenis protein yang larut dalam air dengan fraksi sebesar 35-36%, dan umumnya tidak diharapkan karena menyebabkan pembentukan gel yang kurang baik pada produk gel ikan. Protein stroma merupakan protein jaringan ikat yang tidak larut dengan fraksi sebesar 7-8%, yang umumnya terdiri dari kolagen. Protein ini berperan pelindung yang membentuk serat (Kamal et al. 2000).

Struktur daging udang dapat diamati secara histologis menggunakan mikroskop dan secara mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Secara pengamatan histologi, bagian daging udang terdiri dari dua bagian, yaitu miomer dan mioseptum. Miomer menandakan gumpalan daging protein miofibril dan mioseptum merupakan pembatas antar miofibril. Pada kondisi udang segar struktur daging akan terlihat teratur, miomer masih utuh, tidak pecah dan mioseptum masih rapat. Namun pada kondisi udang busuk, struktur daging tersusun tidak rapih, miomer akan terlihat pecah, dan mioseptum semakin lebar. Pengamatan struktur daging udang secara histologis disajikan pada Gambar 7.

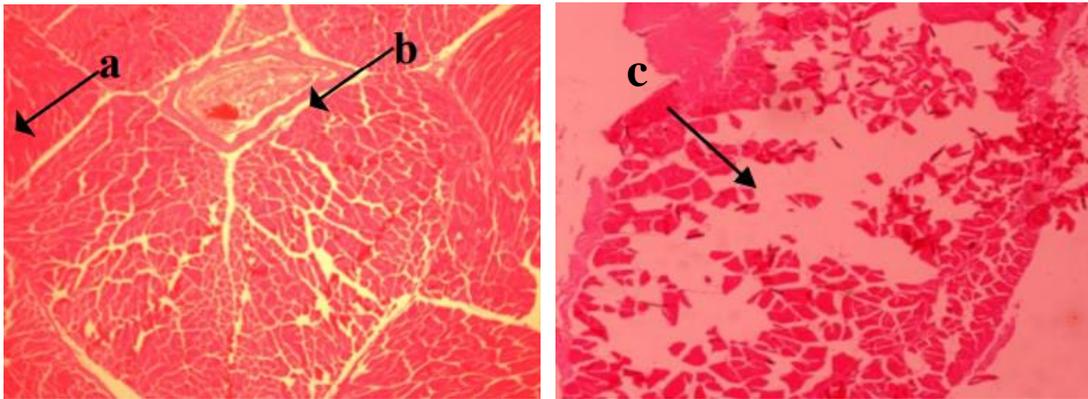
Pengolahan pangan menggunakan subkritis dan superkritis CO₂ mempengaruhi tekstur bahan pangan tersebut. Struktur jaringan daging udang yang terpapar pada perlakuan pengolahan dengan karbon dioksida bertekanan tinggi pada tekanan, suhu dan lama kontak bahan pangan dengan CO₂ superkritis menunjukkan perubahan pada kekompakan jaringan daging (Gambar 8). Struktur jaringan daging udang kontrol (tanpa pengolahan) menunjukkan jaringan kompak saling terkait antara jaringan penyusun daging dan padat, baik pada penampang melintang maupun pada penampang membujur irisan

daging udang. Secara pengamatan mikrostruktur melalui SEM, bagian dari daging udang dapat terdiri dari beberapa bagian yaitu miofibril, miofilamen, sarkomer, dan sarkolema. Miofibril merupakan bagian serat daging yang merupakan kumpulan dari miofilamen, sedangkan miofilamen merupakan sebutan untuk serat-serat daging yang berkumpul dalam pada miofibril. Sarkomer merupakan sebutan untuk satuan kumpulan dari miofibril, dan sarkolema merupakan pembungkus dari miofibril. Pada pengamatan mikrostruktur menggunakan SEM, udang yang segar akan memiliki struktur sarkomer yang teratur dan kompak dimana miofibril dan miofilamen masih utuh. Sebaliknya pada kondisi udang yang sudah mengalami kerusakan oleh pengolahan menggunakan karbon dioksida superkritis pada suhu dan tekanan 31°C dan 7,38 MPa, maka struktur daging akan hancur, miofilamen terpisah, jarak antar miofibril semakin lebar, dan sarkolema mulai pecah, seperti terlihat pada Gambar 8. Pada kondisi ini tekstur daging udang akan menurun konsistensi dan kekenyalannya (Jantakoson et al. 2012; Manheem et al. 2013; Kustyawati et al., 2021).

Tekstur

Pengolahan pangan menggunakan subkritis dan superkritis CO₂ mempengaruhi tekstur bahan pangan tersebut. Perubahan tekstur terutama kekerasan udang disebabkan oleh denaturasi protein sebagai hasil pengolahan. Namun, bisa juga denaturasi protein tidak terjadi pada semua perlakuan CO₂ superkritis, tetapi sebaliknya, terjadi denaturasi parsial protein udang. Gambar 9 menunjukkan perubahan tekstur kekerasan udang yang diolah menggunakan subkritis dan superkritis CO₂. Struktur jaringan daging udang yang terpapar pada perlakuan pengolahan dengan karbon dioksida bertekanan tinggi pada tekanan, suhu dan lama kontak bahan pangan dengan CO₂ superkritis menunjukkan perubahan pada kekompakan jaringan daging (Gambar 9). Struktur jaringan daging udang kontrol (tanpa pengolahan) menunjukkan jaringan kompak saling terkait antara jaringan penyusun daging dan padat, baik pada penampang melintang maupun pada penampang membujur irisan daging udang. Protein didenaturasi ketika struktur sekundernya yang terdiri dari asam amino yang dihubungkan oleh ikatan hidrogen rusak. Sebaliknya, denaturasi parsial, hilangnya sebagian struktur protein dimensi pohon, adalah ketika struktur protein tersier dibuka karena kerusakan interaksi hidrofobik. Struktur tersier protein yang terdiri dari

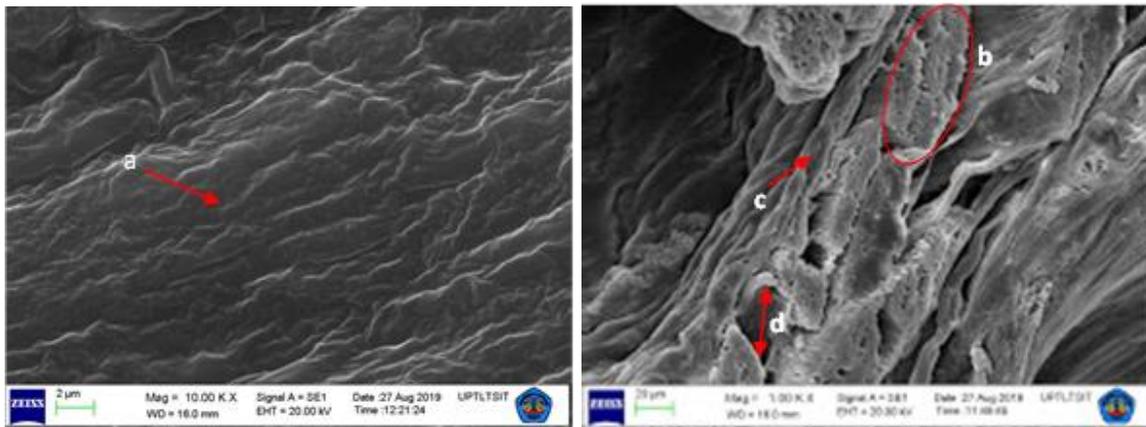
heliks alfa dan lembaran beta disatukan oleh interaksi lemah seperti ikatan hidrofobik, gaya van der Waals, dan ikatan ionik, dan interaksi hidrofobik sebagai gaya utama yang menyebabkan pelipatan protein.



Gambar 7. Struktur daging udang kondisi segar (kiri) dan busuk (kanan) melalui pengamatan histologis

Keterangan: (a) miomer, (b) mioseptum, (c) ruang antar miomer.

Sumber: Utari (2014)



Gambar 8. Mikrostruktur daging udang menggunakan SEM

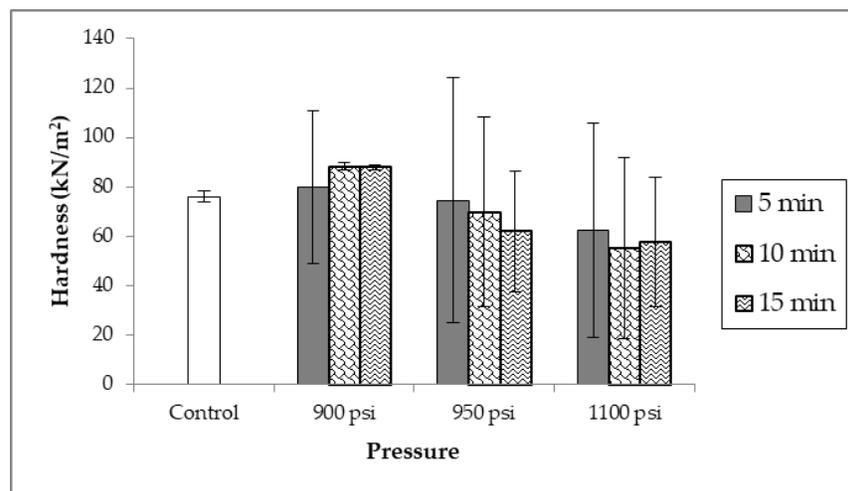
Keterangan: (a) mifibril, (b) miofilamen, (c) sarkolema, (d) ruang antar myofibril

Sumber: Kustyawati et al. (2021)

Hasil pengamatan SEM menunjukkan pada udang yang diberikan perlakuan teknologi CO₂ superkritik terdapat perubahan mikrostruktur berupa adanya ruang-ruang kosong antar miofibril atau sel daging udang. Ruang-ruang yang kosong tersebut dapat

terisi oleh air pada saat rehidrasi sehingga dapat mengakibatkan tekstur daging udang mengalami perubahan. Sifat mikrostruktur bahan dapat dipengaruhi oleh tekanan turgor sel dan integritas komponen penyusun dinding sel pada suatu bahan pangan. Pemberian tekanan yang tinggi seperti pada teknologi superkritis dapat menyebabkan kerusakan pada membrane sel sehingga tekanan turgor menurun, dinding sel menjadi mengerut dan menimbulkan ruang-ruang kosong diantara sel.

Pada tekanan 1100 psi, CO₂ merupakan fluida superkritis yang memiliki kompresibilitas tinggi yang dapat berinteraksi dengan ikatan hidrofobik di dalam protein, menyebabkan terbukanya struktur tersier. Struktur protein yang tidak terlipat meningkatkan hidrofobisitas permukaannya sehingga memungkinkan air bebas dalam matriks makanan untuk berinteraksi dan menghasilkan tekstur yang lembut. Denaturasi parsial yang melibatkan kerusakan ikatan non kovalen adalah perubahan struktur protein yang reversible sehingga selama pelepasan tekanan CO₂, struktur protein yang tidak terlipat dapat kembali ke struktur aslinya. Tekanan tinggi pada 200 MPa selama 20 menit juga menyebabkan denaturasi protein miosin dan aktin udang, yang menyebabkan peningkatan kekerasan tekstur udang.



Gambar 9. Tekstur udang perlakuan teknologi superkritis

Sumber: Kustyawati et al. (2021)

Pengolahan udang dengan panas tidak menunjukkan kecenderungan yang jelas terhadap perubahan tekstur udang, misalnya tekstur tidak menjadi lebih keras atau lebih

lembut dengan meningkatkan suhu. Gaya/tenaga yang diperlukan untuk memotong melalui ekor udang melintang sepanjang sumbu disebut *tenderness*. Semakin rendah gaya semakin tender (lembut) daging udang. Pemasakan udang hingga 50°C tidak menunjukkan perubahan tekstur yang signifikan, namun pada suhu 70°C dapat melunakan daging udang, dan pada suhu 80°C daging udang berubah menjadi keras. Daging udang menjadi lebih keras jika diproses pada suhu yang lebih tinggi. Diasumsikan bahwa perubahan tekstur terutama karena denaturasi intraseluler protein oleh panas, yang meningkat secara bertahap dari 30 hingga 60°C. Pada temperatur 70°C, denaturasi ini terjadi sedemikian rupa sehingga terjadi penyusutan pada daging yang dipanaskan (Schubring, 2009).

Daftar Pustaka

- Amparyup, P., Charoensapsri, W., & Tassanakajon, A. (2013). Prophenoloxidase system and its role in shrimp immune responses against major pathogens. *Fish & Shellfish Immunology*, 34(4), 990-1001.
- García-Carreno, F. L., Cota, K., & Navarrete Del Toro, M. A. (2008). Phenoloxidase activity of hemocyanin in whiteleg shrimp *Penaeus vannamei*: conversion, characterization of catalytic properties, and role in postmortem melanosis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), 6454-6459.
- Kustyawati et al, (2021). Quality and shelf-life of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) processed high pressure carbon dioxide (HPCD) at subcritical and supercritical state. *J. of Food Quality*, in process of publication
- Jantakoson, T., Kijroongrojana, K., & Benjakul, S. (2012). Effect of high pressure and heat treatments on black tiger shrimp (*Penaeus monodon* Fabricius) muscle protein. *International Aquatic Research*, 4(1), 1–12.
- Manheem, K., Benjakul, S., Kijroongrojana, K., Faithong, N., & Visessanguan, W. (2013). Effect of pre-cooking times on enzymes, properties, and melanosis of Pacific white shrimp during refrigerated storage. *International Aquatic Research*, 5(1), 1–11.
- Nirmal, N. P., & Benjakul, S. (2010). Effect of catechin and ferulic acid on melanosis and quality of Pacific white shrimp subjected to prior freezeethawing during refrigerated storage. *Food Control*, 21(9), 1263-1271.

- Palou E, Welti-chanes J, Palou E, Swanson BG. (1999). Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic. *J. Food Sci.* 64(1):42–45.
- Senapati, R. S., Kumar, G. P., Singh, C. B., Xavier, K. A. M., Chouksey, M. K., Nayak, B. B., Balange, A.K. (2017). Melanosis and quality attributes of chill stored farm raised whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Journal of Applied and Natural Science*, 9(1), 626-631.
- Schubring. (2009). Comparative study of DSC pattern, colour and texture of shrimps during heating. *Journal of Thermal Analysis and Colorimetry*, 95(3):749-757.
- Utari, S.A. (2014). Kemunduran mutu udang putih: Organoleptik, blackspot, histologis, dan enzimatis. Skripsi. Bogor. Institut Pertanian Bogor.

BAB 6. KOLESTEROL UDANG

Pendahuluan

Kolesterol ($C_{27}H_{46}O$) adalah salah satu sterol utama yang ditemukan dalam jaringan hewan. Kolesterol termasuk jenis lemak tak jenuh dan dapat muncul dalam bentuk bebas, dikombinasikan dengan asam lemak rantai panjang atau sebagai ester kolesterol, menjadikannya komponen struktural penting dari membran dan lipoprotein plasma, serta menjadi prekursor dalam sintesis hormon steroid, asam, dan vitamin D (Morzycki 2014). Kolesterol diproduksi dalam tubuh terutama oleh hati tetapi jika produksi kolesterol berlebihan dapat meningkatkan risiko penyumbatan dan penyempitan pembuluh arteri atau aterosklerosis.

Udang, sebagai makanan hasil laut yang paling banyak dikonsumsi merupakan bahan pangan yang mempunyai nilai gizi tinggi dan mengandung zat gizi tertentu yang tidak banyak dimiliki oleh bahan pangan lain, yaitu Iodin. Iodine merupakan mineral yang kebanyakan orang mengalami defisiensi. Iodin diperlukan dalam menjaga fungsi kelenjar tiroid. Walaupun sebagian kelompok orang berpendapat bahwa udang adalah makanan yang kurang sehat karena kandungan kolesterolnya tinggi yang menyebabkan kolesterol darah meningkat sehingga mendorong timbulnya penyakit jantung. Namun udang adalah makanan sehat yang perlu dimasukkan ke dalam diet manusia. Beberapa pustaka mengatakan bahwa kandungan kalori udang sangat rendah, kurang lebih 84 kalori dalam 85 gram daging udang. Lebih kurang 90% dari kalori tersebut berasal dari protein dan lemak. Disamping itu, sejumlah udang tersebut juga memberikan lebih kurang 20 macam vitamin dan mineral, termasuk 50% dari kebutuhan manusia akan selenium. Selenium adalah mineral yang membantu kesehatan jantung. Udang juga merupakan sumber asam lemak omega-3, omega-6, disamping penyedia antioksidan astaxanthin. Astaxanthin adalah golongan karotenoid dalam udang dan mempunyai berbagai fungsi kesehatan manusia.

Udang memiliki kandungan protein yang tinggi, asam lemak jenuh yang rendah, asam lemak tak jenuh ganda yang baik untuk kesehatan (Abreu et al. 2010), namun dibalik itu udang memiliki kandungan kolesterol yang tergolong tinggi dan kerap dianggap sebagai

aspek gizi negatif. Namun tinggi atau rendahnya kolesterol pada udang dipengaruhi oleh jenis pakan yang diberikan (Santos et al. 2017). Kandungan kolesterol pada udang dari berbagai spesies disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Kandungan kolesterol pada beberapa spesies udang

| Spesies udang | Kolesterol (mg/100g) | Referensi |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| <i>Litopenaeus schimitti</i> | 115.17-417.05 | Pires et al. (2018) |
| | 121-124 | Bragagnolo & Rodriguez (2001) |
| <i>Litopenaeus vannamei</i> | 130.09-318.77 | Moura et al. (2013) |
| | 199.83 | Daniswara et al. (2020) |
| | 137 | Higuera-Ciapara et al. (2005) |
| | 163 | Kustyawati (2019) |
| <i>Farfantepenaeus schimitti</i> | 218.20-361.17 | Moura et al. (2013) |
| <i>Xiphopenaeus kroyeri</i> | 134 | Bragagnolo & Rodriguez (2001) |
| <i>Macrobrachium rosenbergii</i> | 139 | Bragagnolo & Rodriguez (2001) |
| <i>Penaeus brasiliensis</i> | 114-134 | Bragagnolo & Rodriguez (2001) |
| <i>Crangon crangon</i> | 173.56 | Turan et al. (2011) |
| <i>Penaeus indicus</i> | 115.22 | Novrihansa (2016) |

Persepsi udang dengan bahan makanan berkadar kolesterol yang tinggi berkaitan dengan penyakit kardiovaskuler, sehingga praktisi medis dan ahli diet menempatkan udang sebagai makanan yang dapat dihindari dengan mengabaikan profil lemak dan asam lemaknya secara keseluruhan. Udang diyakini dapat menyebabkan efek kesehatan yang merugikan dengan meningkatkan kadar kolesterol serum (Lira et al. 2014). Uji klinis pada manusia menunjukkan bahwa udang ketika dikonsumsi dalam jumlah sedang dapat memainkan peran sebagai diet untuk kesehatan jantung, karena tidak secara nyata mempengaruhi rasio HDL 'baik' dengan kolesterol LDL 'buruk'. Tiga jenis lipoprotein yang dapat mengangkut kolesterol yaitu HDL (*High-density Lipoprotein*), LDL (*Low-density Lipoprotein*) dan VLDL (*Very Low-density Lipoprotein*). Orang yang terserang jantung koroner umumnya memiliki tingkat LDL/VLDL yang lebih tinggi dan HDL yang lebih rendah. Tingkat LDL dan VLDL yang tinggi akan menyebabkan terjadinya deposisi kolesterol lemak, sisa-sisa sel rusak dan komponen lainnya di sepanjang pembuluh darah

sehingga membentuk kerak yang menyebabkan penyempitan pembuluh darah. Saat ini rekomendasi batas asupan kolesterol per hari menurut American Heart Association adalah 200 mg (Arnett et al. 2019) dan di Indonesia rekomendasi batas asupan kolesterol harian adalah 300 mg (Kartono et al. 2012). Udang dapat dimasukkan ke dalam pola makan yang menyehatkan jantung bila dikombinasikan dengan sumber protein nabati atau tanpa lemak lainnya (Carson et al. 2020).

Penurunan Kolesterol Udang

Pengolahan udang diyakini dapat menurunkan kadar kolesterol dengan tujuan agar lebih aman untuk dikonsumsi. Berbagai cara telah dilaporkan dapat menurunkan kolesterol pada udang, seperti perebusan pada air garam, pengasapan dengan asap cair, aplikasi saponin, dan teknologi CO₂ superkritis. Kolesterol udang segar sebesar 115.22 mg/100g dan nilai kolesterol udang yang direbus pada larutan garam 0%, 1%, 2%, dan 3% masing-masing adalah 93.78, 71.31, dan 44.48 mg/100g (Novrihansa 2016). Peningkatan kandungan garam menyebabkan plasmolisis pada daging udang sehingga asam lemak dan kolesterol akan keluar menuju air rebusan. Sementara pemberian panas menyebabkan kolesterol larut bersamaan dengan terlepasnya air dari bahan dan menguapnya senyawa volatil yang dihasilkan, meliputi alkohol dan hidrokarbon (Jacoeb et al. 2014). Pengolahan udang dengan cara perebusan (*water in boiling*) merupakan cara yang baik bagi produk (pangan) karena dapat mengurangi komponen kolesterol oksida, khususnya kolesterol bebas dan komponen 7-ketokolesterol (7-keto), sehingga aman untuk dikonsumsi. Senyawa fenol pada asap cair berperan sebagai antioksidan bagi asam lemak tak jenuh yaitu asam lemak omega-3, omega-6, dan omega-9. Semakin tinggi konsentrasi asap cair yang digunakan maka secara signifikan menurunkan kadar kolesterol udang. Fenol menghambat oksidasi pada asam lemak agar tidak berikatan dengan oksigen dengan mendonorkan atom hidrogen. Hal ini akan menyebabkan kenaikan lemak dan kenaikan ini menurunkan kadar kolesterol.

Saponin adalah molekul amfifilik yang diproduksi oleh banyak tumbuhan dan telah diizinkan untuk digunakan sebagai bahan tambahan makanan di banyak negara. Aplikasi saponin secara signifikan dapat mereduksi kadar kolesterol dari udang *Litopenaeus*

vannamei, berkisar dari 20% hingga 88.7%. Lipid pada udang mengandung fosfolipid tingkat tinggi dan diketahui bahwa saponin memiliki kemampuan untuk mengikat fosfolipid (Gulzar et al. 2020). Sifat tersebut mendukung pengikatan lipid polar seperti fosfolipid bersama dengan kolesterol dalam lipid udang, sehingga kadar kolesterol mengalami penurunan.

Pengaruh Teknologi CO₂ Superkritis pada Kolesterol Udang

Ekstraksi superkritis meliputi proses pemanasan fluida di atas suhu kritisnya dan memberikan tekanan di atas tekanan kritisnya sehingga perbedaan antara fase cair dan gas hilang, dan fluida tidak dapat lagi dijadikan cair dengan meningkatkan tekanannya, maupun tidak dapat menjadi gas dengan cara meningkatkan suhunya. Fluida dalam kondisi tersebut memperoleh sifat termodinamika dan transpor yang sedemikian rupa dan menyebabkan rasio perpindahan massa zat terlarutnya jauh lebih besar daripada dalam pelarut cair biasa. Rekayasa maupun manipulasi kondisi operasi seperti ini selama proses ekstraksi superkritis, cairan superkritis dapat secara efektif dan selektif dalam mengekstrak berbagai komponen tertentu seperti lemak, minyak, kolesterol, keton, aldehida, dan ester serta membiarkan protein dan karbohidrat dalam keadaan utuh. Karbon dioksida dipilih sebagai pelarut dalam teknologi superkritis secara umum karena didasari oleh karakteristiknya yang aman, tidak bersifat toksik, berbiaya rendah, dan mudah pulih.

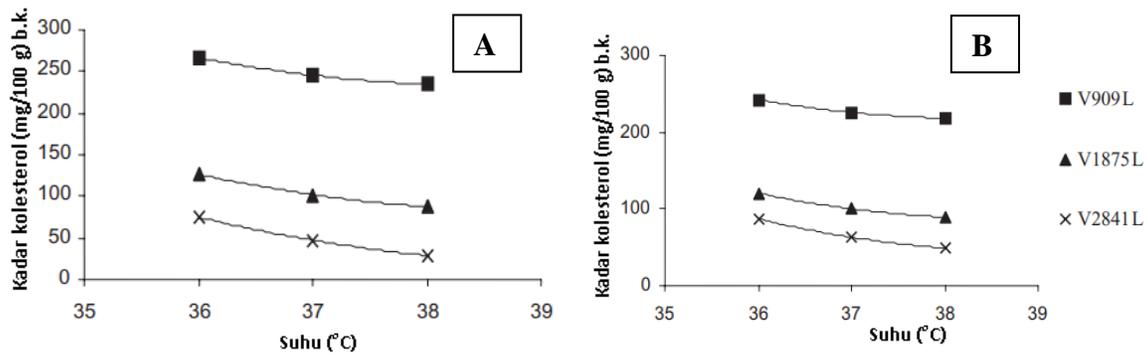
Penggunaan teknologi CO₂ superkritis secara signifikan dapat menurunkan kadar kolesterol udang *Litopenaeus vannamei*, bergantung pada tekanan dan waktu pengolahan yang diberikan (Kustyawati 2021). Tabel 9 menunjukkan perubahan kadar kolesterol udang yang diolah menggunakan superkritis dan subkritis CO₂. Udang segar tanpa perlakuan memiliki kadar kolesterol sebesar 163 mg/100g, kemudian mengalami penurunan pada perlakuan tekanan 900 psi dengan kadar kolesterol berkisar pada 127-146 mg/100g, tekanan 950 psi berkisar pada 136-147 mg/100g, dan tekanan 1100 psi berkisar pada 134-148 mg/100g. Teknologi CO₂ superkritis mampu mengekstrak kolesterol dari dalam bahan berdasarkan interaksi dari sifat kepolaran dan kelarutan CO₂ pada titik kritisnya, sehingga dengan teknologi ini dapat menurunkan kadar kolesterol (Kustyawati et al., 2021; Nautiyal 2016). Kolesterol terekstraksi dalam C CO₂ subkritis (900 psi) dan CO₂ superkritis (1100

psi). Hal ini dapat dijelaskan dengan mempertimbangkan polaritas dan kelarutan CO₂. Pada daerah superkritis, superkritis CO₂ (sc CO₂) memiliki kelarutan yang tinggi, dimana densitas sc CO₂ meningkat dengan meningkatnya tekanan, sehingga lebih banyak kolesterol yang terekstraksi. Di daerah subkritis sedikit di bawah titik kritis, CO₂ dapat berupa cairan yang lebih polar, dan kemungkinan besar kolesterol dapat diekstraksi dalam fase CO₂ ini. Di bawah titik kritis dan di atas titik tripel -56,6°C dan 0,52 MPa, CO₂ berada sebagai zat cair. Pada dan di atas suhu kritis 31°C dan tekanan kritis 7,35 MPa (titik kritis), CO₂ ada sebagai gas dan cairan dalam kesetimbangan; peningkatan suhu atau tekanan di atas titik kritis ini tidak mengakibatkan perubahan fase lebih lanjut. Kolesterol (C₂₇H₄₆O) sebagian besar merupakan senyawa hidrokarbon non polar, tetapi kolesterol larut dalam air karena memiliki gugus fungsi OH polar sehingga kolesterol yang terekstraksi lebih banyak pada 900 psi. Kadar kolesterol semua udang olahan pada penelitian kami sesuai dengan asupan harian yang dianjurkan (<300 mg / hari). Namun, perlu tetap berhati-hati dalam memasukkan udang ke dalam makanan, karena total kolesterol normal dalam darah manusia adalah 160-200 mg/100g. Semakin tinggi kadar kolesterol dalam darah maka semakin besar pula risiko terjadinya aterosklerosis yaitu penebalan dan pengerasan dinding arteri akibat penumpukan kolesterol.

Tabel 9. Efek tekanan dan suhu CO₂ subkritis terhadap kolesterol udang.

| Tekanan (psi)/ suhu (°C) CO ₂ / lama proses (menit) | Kolesterol (mg/g) |
|---|-------------------|
| Kontrol | 1,63± 0,016 |
| 900/25/5 | 1,39±0,013 |
| 900/25/10 | 1,27±0,017 |
| 900/25/15 | 1,46±0,015 |
| 950/27/5 | 1,47±0,001 |
| 950/27/10 | 1,40±0,018 |
| 950/27/15 | 1,36±0,011 |
| 1100/31/5 | 1,46±0,017 |
| 1100/31/10 | 1,48±0,017 |
| 1100/31/15 | 1,34±0,016 |

Sumber: Kustyawati ME., 2019 (unpublished)



Gambar 10. Pengaruh suhu dan volume CO₂ terhadap sisa kolesterol udang Tekanan (A) 331 bar, (B) 310 bar

Sumber: Higuera-Ciapara et al. (2005)

Gambar 10 menunjukkan pengaruh suhu terhadap kandungan sisa kolesterol udang untuk volume CO₂ yang berbeda pada tekanan 331 bar dan 310 bar. Kadar kolesterol sisa menurun dengan meningkatnya volume CO₂ terhadap suhu. Pada teknologi superkritis, pengaruh suhu terhadap kelarutan sangat kompleks karena terdapat interaksi dua kondisi yang berlawanan dan bersamaan, yaitu peningkatan kelarutan dan penurunan massa jenis fluida karena peningkatan suhu. Pada rentang suhu yang digunakan, massa jenis kurang sensitif terhadap perubahan suhu sedangkan peningkatan tekanan uap menjadi faktor dominan; oleh karena itu, peningkatan suhu menyebabkan peningkatan kelarutan. Perlakuan suhu dengan kadar kolesterol sisa yang lebih rendah diperoleh pada suhu 38°C. Teknologi superkritis ini bisa digunakan untuk mendapatkan produk akhir yang sesuai dengan kategori makanan rendah kolesterol.

Oksidasi Kolesterol

Kandungan kolesterol pada produk perikanan seperti udang, secara kimia bersifat tidak stabil dan dapat mengalami autooksidasi atau oksidasi non-enzimatik yang menghasilkan produk oksidasi kolesterol (*Cholesterol Oxidation Product/COP*) atau kolesterol oksida. Kolesterol oksida merupakan bagian dari kelompok sterol dengan struktur yang mirip dengan kolesterol; namun, mereka mengandung gugus hidroksil, keton atau epoksida tambahan dalam inti sterol atau gugus hidroksil yang ditemukan pada rantai samping molekul. Kandungan kolesterol oksida ini bergantung pada suhu, waktu

penyimpanan, keberadaan oksigen, dan metode pengolahan. Pada bahan pangan, kolesterol oksida dibentuk oleh oksidasi non-enzimatik atau proses autoksidasi.

Daftar Pustaka

- Abreu, V. K. G., Pereira, A. L. F., Vidal, T. F., Zapata, J. F. F., Sousa-Neto, M. A. & Freitas, E. R. (2010). Fatty acids, cholesterol, oxidative rancidity, and color of irradiated shrimp. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(4), 969-973.
- Carson, J.A.S, Lichtenstein, A.H., Anderson, C.A.M., Appel, L.W.J, Kris-Etherton, P.M., Meyer, K.A., Petersen, K., Polonsky, T., & Horn, L.V. (2020). Dietary cholesterol and cardiovascular risk: A science advisory from the American Heart Association. *Circulation*, 141, 39-53.
- Colpo, A. (2005). LDL Cholestrerol: bad cholesterol science cholesterol. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 10(3), 83-89.
- Daniswara, N.P., Swastawati, F., & Purnamayati, L. (2020). Fatty acid profile and cholesterol level of smoked whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) with different liquid smoke concentrations. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 404, 1-9.
- Gulzar, S., Raju, N., Nagarajaro, R.C., & Benjakul, S. (2020). Oil and pigments from shrimp processing by-products: Extraction, composition, bioactivities and its application-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 307–319.
- Higuera-Ciapara, I., Toledo-Guillen, A. R., Noriega-Orozco, L., Martinez-Robinson, K. G., & Esquade-Valle, M. C. (2005). Production of a low-cholesterol shrimp using supercritical extraction. *Journal of Food Process Engineering*, 28(5), 526–538.
- Jacob, A.M., Suptijah, P., & Kamila, R. (2014). Kandungan asam lemak, kolesterol, dan deskripsi jaringan daging belut segar dan rebus. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 17(2), 134-143.

- Kartono, D., Hardiyansyah, Jahari, A. B., & Sulaeman, A. (2012). Summary of Recommended Nutritional Adequacy for Indonesians. *Widyakarya Nasional Pangan dan Gizi (WNPG) X*, (April 2017), 1–18.
- Kustyawati, M.E. (2019). *Teknologi CO₂ Superkritis untuk Pengolahan Udang*. Bandar Lampung: Pusaka Media.
- Lira, G.M., Silva, M.C.D., Silva, K.W.B., Padilha, B.M., Cavalcanti, S.A.T.Q., Oliveira, K.I.V. & Albuquerque, A.L.I. (2013). Evaluation of physicochemical and microbiological quality of the in natura and smoked “spike” shrimp (*Xiphopenaeus kroyeri*, HELLER, 1862). *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, 31(1), 151-160.
- Morzycki, J.W. (2014). Recent advances in cholesterol chemistry. *Steroids*, 83, 62–79.
- Moura, L. B., Cavalheiro, J. M. O., & Bora, P. S. (2013). Lipid profile, fatty acid composition and cholesterol content in shrimp. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 8(4), 197-201.
- Novrihansa, R. (2016). Pengaruh penambahan konsentrasi garam berbeda selama perebusan terhadap kandungan kolesterol udang putih (*Penaeus indicus*). Skripsi. Universitas Riau.
- Pires, D.R., de Moraes, C.A.N., Coelho, C.C.S., Marinho, A.F., Goes, L.C.D., Augusta, S.A., Ferreira, I.M., & Saldanha, T. (2018). Nutritional composition, fatty acids and cholesterol levels in Atlantic white shrimp (*Litopenaeus schimitti*). *International Food Research Journal*, 25(1), 151–157.
- Santos, F.L., Araújo, K.G.L, Veloso, M.C.C., Romeiro, G.A., & Andrade, C.T. (2017). Nutritional value of *Macrobrachium rosenbergii* prawns fed on extruded feeds enriched with linseed and whey proteins. *J. Nutr. Food Sci.*, 7, 578.
- Wojciechowski, K., Orczyk, M., Gutlerbert, T., & Geue, T. (2016). Complexation of phospholipids and cholesterol by triterpenic saponins in bulk and in monolayers. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*, 1858(2), 363-373.

BAB 7. MIKROBIOLOGI UDANG

Pendahuluan

Udang memerlukan penanganan yang baik dan cepat sebelum sampai ke konsumen atau diolah karena sifatnya yang mudah rusak. Hal ini dikarenakan adanya pencemaran bakteri dalam jumlah yang tinggi pada udang dari lingkungan hidupnya. Di samping itu, daging udang merupakan media yang baik untuk tumbuh dan berkembang biaknya bakteri pembusuk bila dibandingkan dengan daging ikan karena mengandung lebih banyak karbohidrat dan senyawa nitrogen yang dapat digunakan untuk pertumbuhan bakteri. Udang yang telah terkontaminasi bakteri akan menyebabkan bakteri tersebut tetap dapat hidup untuk jangka waktu yang panjang dalam keadaan beku. Penanganan yang umum dilakukan pada udang, yaitu pendinginan dengan menggunakan es batu segera setelah panen. Akan tetapi, penanganan tersebut belum cukup untuk menurunkan jumlah kandungan bakteri. Bakteri masih bisa mengadakan pertumbuhan dalam kondisi penyimpanan dingin dengan laju pertumbuhan sangat rendah berkorelasi dengan fluktuasi suhu.

Berbagai teknologi baik konvensional maupun non konvensional telah banyak diteliti dan diterapkan dalam industri pengolahan udang maupun petani petambak udang. Penggunaan suhu dingin, suhu beku sudah umum dilakukan terutama untuk mempertahankan kesegaran udang mentah dengan mengendalikan pertumbuhan mikroba. Pengolahan dengan suhu panas, pengeringan, dan *coating* serta pengemasan dengan berbagai teknik seperti vakum, MAP, pengemasan aktif juga sudah banyak diaplikasikan untuk mengurangi jumlah mikroba dan meningkatkan masa simpan. Baru baru ini teknik non konvensional yang telah diteliti oleh beberapa peneliti salah satunya adalah pengolahan teknologi tanpa panas karbon dioksida superkritis (Higuera-Ciapara et al., 2005; Kustyawati et al., 2021). Teknologi tanpa panas karbondioksida superkritis atau disebut dengan *high pressure CO₂* (HPCD) secara signifikan bisa mempertahankan kesegaran udang sekaligus meminimalisasi kehilangan nutrisi namun dapat menekan jumlah mikroba. Dalam Bab ini diulas perubahan populasi mikroba pada pengolahan konvensional dan non

konvensional HPCD, jenis mikroba yang dominan ditemukan dalam udang, dan mikroba yang sensitive terhadap teknologi HPCD. Hal ini sangat penting diketahui karena keberadaan mikroba dalam udang terutama atau pangan umumnya berkorelasi dengan kerusakan dan umur simpan produk.

Sumber Kontaminan Udang

Sumber kontaminasi pada udang terjadi pada saat panen, penanganan, dan pada waktu transportasi. Tercemarnya udang dengan bakteri pathogen dapat disebabkan oleh air tambak, air proses dan es yang digunakan dalam proses pascapanen disamping faktor sanitasi dan higienis. Indikator bakteriologi dapat diunakan untuk mengetahui kualitas mikrobiologi udang. Indicator ini meliputi kelompok bakteri koli dan kelompok bakteri heterofilik. Kelompok bakteri koli merupakan golongan mikroorganisme yang lazim digunakan sebagai indikator pencemar perairan dan memiliki daya tahan yang lebih tinggi daripada bakteri patogen lain serta lebih mudah diisolasi dan ditumbuhkan. Bakteri patogen yang biasa ditemukan di perairan laut antara lain *Salmonella sp*, *Vibrio sp*, *Aeromonas sp*, *Proteus sp*, dan *Citrobacter sp* (Sutiknowati & Ruyitno, 2008). Apabila ditemukan kepadatan bakteri koli melebihi ambang batas yang ditentukan KLH (0-1000 koloni/ml) dan adanya bakteri patogen dengan kepadatan yang tinggi, maka perairan tersebut tidak layak untuk kegiatan budidaya karena dapat menyebabkan kematian benih secara massal dan turunya kualitas biota paska panen (Faghri et al., 1984; Sutiknowati, 2011). WHO (1988) merekomendasi tiga kelompok bakteri indikator pencemaran perairan laut dan darat yaitu fecal coliform, fecal streptococcus dan patogen (*Salmonella sp.*, *Vibrio sp.*, *E.coli*).

Kelompok bakteri heterotrofik merupakan bakteri non patogen dan salah satu indikator aktivitas penguraian senyawa organik yang menunjukkan kesuburan perairan dan berkaitan dengan pakan alami bagi biota laut. Bakteri heterotrofik di lingkungan laut berperan sangat vital sebagai dekomposer yang menguraikan material organik menjadi konstituen yang lebih sederhana sebagai unsur hara yang esensial (Azam & Malfatti, 2007; Ruyitno, 2004). Beberapa jenis bakteri heterotrofik antara lain *Pseudomonas sp*, *Micrococcus sp*, *Sarcina sp*, *Staphylococcus sp* dan *Flavobacterium sp*. Termasuk dalam kelompok bakteriheterotrofik adalah bakteri pemecah fosfat, nitrat, dan amonia. Beberapa

jenis bakteri patogen yang berhasil diisolasi dari air laut maupun sedimen adalah *Aeromonas sp*, *Pseudomonas sp*, *Proteus sp*, *Citrobacter sp*, *Shigella sp* dan *Yersinia sp*, yang dominan di air dan sedimen adalah *Proteus sp* dan *Citrobacter sp*. (Sutiknowati, 2014).

Kualitas Bakteriologi Udang Beku

Berbagai jenis bakteri yang ditemukan pada udang sangat dipengaruhi oleh kualitas perairan tambak, keadaan dan sanitasi tempat pemanenan. Pada udang sering ditemukan bakteri dari golongan *Achromobacter*, *Alcaligenes* dan *Pseudomonas*. Seringkali pada ekor udang ditemukan *Micrococcus* dan *Staphylococcus*. *Achromobacter* dan *Pseudomonas* merupakan bakteri pembusuk pada udang. Kedua bakteri tersebut tergolong Psikrofil. Bakteri lain yang dapat membusukkan udang adalah *Aerobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Sarcina* dan *Staphylococcus*. Bakteri psikrofil mudah ditemukan pada udang yang disimpan pada suhu dingin. Pinu et al. (2007) mengisolasi *Vibrio spp*, *Shigella spp* dan *Salmonella spp* dari udang beku retail di pasar lokal kota Dhaka, India. *Salmonella spp* ini lebih mungkin berasal dari lingkungan dimana udang dibudidayakan dari pada berasal dari standar hygiene yang kurang, sanitasi tidak memenuhi standard, dan dari kotoran burung yang digunakan sebagai pakan udang. Namun demikian udang mengalami pemasakan lebih dahulu sebelum dihidangkan ke konsumen sehingga masih memenuhi standar kesehatan. Kecuali terjadi kontaminasi silang selama pengolahan. *Vibrio spp* normalnya tidak dapat bertahan hidup dalam suhu beku dan *Vibrio spp* memerlukan kadar air yang cukup dalam produk untuk bertahan hidup. Oleh karena itu, keberadaan *Vibrio spp* dalam udang beku sangat mungkin disebabkan oleh proses pembekuan yang tidak sempurna dan masih adanya uap air selama pembekuan. Kontaminasi *Salmonella spp* pada udang umumnya berasal dari pekerja yang terinfeksi oleh *Salmonella* atau dari lingkungan. Lebih sering kontaminasi berasal dari individu yang terinfeksi pilek atau sakit tenggorokan. Stafilocokus adalah pesaing yang buruk dan tidak tumbuh dengan baik jika ada mikroorganisme lain. Dengan demikian, keberadaan stafilocokus dalam makanan mentah yang terkontaminasi secara alami tidak signifikan. Sebaliknya, pertumbuhan cepat dan produksi toksin dapat terjadi pada udang yang dimasak

sebelumnya (*precooked*) jika terkontaminasi ulang, dengan menghasilkan enterotoksin dalam jumlah besar saat tumbuh di dalam makanan. Racun ini umumnya sangat resisten terhadap enzim proteolitik dan panas. Panas pada suhu pasturisasi dan suhu memasak rumah tangga biasa tidak cukup untuk menghancurkan toksin.

Inaktivasi Mikroba Udang

Karbon dioksida superkritis lebih efektif dalam menonaktifkan mikroorganisme daripada CO₂ dibawah kondisi subkritis (Tabel 10). Meningkatnya kematian mikroba pada kondisi CO₂ subkritis bisa dikaitkan dengan sifat fisik-kimia, yang berada di antara kedua fase cair dan gas. CO₂ superkritis lebih mempunyai sifat yang kepadatan seperti cairan, sementara sifat transportasi massa lebih mendekati sifat gas. Kepadatan seperti cairan memiliki sifat solvasinya lebih tinggi dibandingkan dengan keadaan gas. Di sisi lain, sifat transportasi massa seperti gas meningkatkan laju difusi bila dibandingkan dengan fase cairan. Penggunaan CO₂ superkritis sebagai media inaktivasi dengan demikian mempengaruhi membran sel dan konstituen isi sel secara signifikan mengakibatkan peningkatan gangguan sistem biologis. Pada Tabel 10 dan 11 terlihat bahwa terjadi penurunan jumlah mikroba dengan meningkatnya tekanan CO₂, namun lama waktu penekanan tidak menunjukkan korelasi.

Tabel 10. Pengaruh tekanan dan lama tekan terhadap penurunan jumlah mikroba udang

| Tekanan/lama tekan (psi/menit) | Penurunan jumlah mikroba (log N/No) |
|-----------------------------------|--|
| Kontrol | 4,24±0,33 a |
| 900/5 | 3,80±1,09 b |
| 900/10 | 3.78±0.09 bc |
| 900/15 | 3.79±0.64 bc |
| 950/5 | 3.77±2.02 c |
| 950/10 | 3.76±0.37 c |
| 950/15 | 3.69±0.55 c |
| 1100/5 | 2.51±0.29 d |

| Tekanan/lama tekan (psi/menit) | Penurunan jumlah mikroba (log N/No) |
|-----------------------------------|--|
| 1100/10 | 2.37±0.06 d |
| 1100/15 | 2.29±0.12 d |

Nilai yang diikuti dengan huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan ($p \leq 0.05$). Sumber: Kustyawati et al., 2021.

Tabel 11. Penurunan jumlah bakteri dan kapang dipengaruhi oleh tekanan dan lama waktu proses

| Tekanan (MPa) dan waktu proses (menit) | Rata-rata jumlah kapang (cfu/g) | Rata-rata jumlah bakteri (cfu/g) | Penurunan jumlah (Siklus log) | |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------|
| | | | Kapang | Bakteri |
| Kontrol | $6,1 \times 10^6$ | $2,3 \times 10^7$ | | |
| 7,6 dan 5 | $2,5 \times 10^4$ | $7,4 \times 10^6$ | -2.3 ±0,1 | -0,5± 0,02 |
| 7,6 dan 10 | $3,8 \times 10^2$ | $7,1 \times 10^5$ | -4,2± 0,1 | -1,5± 0,1 |
| 7,6 dan 15 | 1 | $1,1 \times 10^5$ | -6,4 ±0,0 | -2,2 ±0,1 |
| 7,6 dan 20 | 1 | $9,5 \times 10^4$ | -6,5 ±0,0 | -2,4 ±0,03 |
| 6,3 dan 5 | $3,7 \times 10^5$ | $1,2 \times 10^7$ | -1,2 ±0,1 | -0,3 ±0,02 |
| 6,3 dan 5 | $4,3 \times 10^4$ | $2,1 \times 10^6$ | -1.9 ±0,3 | -1,1± 0,1 |
| 6,3 dan 5 | $2,5 \times 10$ | $1,1 \times 10^6$ | -5,3 ±0,0 | -1,4 ±0,01 |
| 6,3 dan 5 | 1 | $8,5 \times 10^5$ | -6,5 ±0,0 | -1,5 ±0,03 |

Nilai yang tertulis dalam Tabel 11 adalah rata rata dari tiga kali ulangan. Sumber: Kustyawati et al. (2018).

Perbedaan besarnya penurunan jumlah bakteri disebabkan oleh adanya perbedaan fase CO₂ pada tekanan dan suhu. Jumlah bakteri yang menurun pada tekanan CO₂ superkritis (7,3MPa) dapat dijelaskan bahwa difusivitas CO₂ superkritis yang tinggi mengakibatkan kematian sel karena kerusakan dinding sel, dan keluarnya material dari dalam sitoplasma. Karbon dioksida menembus ke dalam membran sel dan melarutkan lapisan dinding sel dan membran sitoplasma. Terlarutnya lapisan tersebut menyebabkan struktur dinding sel menjadi longgar dan hal ini mengakibatkan cairan sitoplasma akan keluar sel atau terjadi sel *bursting* pada saat tekanan dibebaskan. Pelepasan tekanan dalam waktu cepat (dalam penelitian ini proses pelepasan tekanan berlangsung pada kisaran 2

menit hingga 3 menit) menyebabkan suatu proses yang disebut *throttling*. *Throttling* merupakan suatu proses yang menyebabkan penurunan tekanan secara drastis dalam suatu fluida, dan disertai dengan penurunan suhu. Selama proses *throttling* terjadi aliran CO₂ dari dalam sel ke luar yang dapat mengakibatkan sel bursting. Lapisan dinding sel bakteri Gram negatif (-) tersusun dari lipopolisakarida di bagian luar dan lapisan peptidoglikan di bagian dalam. Lipopolisakarida dan peptidoglikan mudah terlarut dalam CO₂ superkritis karena non-polar. Terlarutnya dinding sel dan membran sel dapat menyebabkan sel lisis dan mengakibatkan kematian. Menurut Xu et al. (2011), lapisan non-polar peptidoglikan terlarut ke dalam CO₂ menyebabkan struktur dinding sel mengembang dan permeabilitas dinding sel meningkat. Perubahan karakteristik dinding sel, dan permeabilitas membran mengakibatkan mekanisme influx dan efflux senyawa dalam sitoplasma tidak terkontrol. Perubahan influx dan efflux mengakibatkan ekstraksi komponen sitoplasma dan inaktivitas enzim yang terikat di dalam membran sehingga mengganggu sistem biologi sel dan mengakibatkan kematian. Kematian bakteri dapat juga disebabkan oleh keasaman medium. Konsentrasi CO₂ yang tinggi meningkatkan keasaman medium karena CO₂ bereaksi dengan air baik air di dalam cairan sitoplasma maupun air di luar sel, dan menghasilkan asam karbonat. Asam karbonat merupakan asam lemah yang berdisosiasi menghasilkan ion H⁺ di dalam medium (tempe mempunyai pH rata-rata 6,06 hingga 7,15).

Menurut Spilimbergo (2012), CO₂ yang berdifusi ke dalam sitoplasma akan berikatan dengan air menghasilkan asam karbonat seperti reaksi berikut: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$. Meningkatnya keasaman di luar sel akan menghambat pertumbuhan mikroorganisme dan menurunkan resistensi mikroorganisme terhadap gangguan fisik karena konsumsi energi yang semakin tinggi diperlukan untuk menjaga keseimbangan keasaman di dalam sel dan di luar sel melalui mekanisme proton *motive force*. Keasaman medium di luar sel menyebabkan impermeabilitas membran meningkat dan mengakibatkan penetrasi CO₂ ke dalam sel semakin meningkat. Selanjutnya CO₂ dalam fase cair menembus membran sel, terakumulasi di bagian dalam dari lapisan fosfolipid dan melarutkan fosfolipid. Di dalam lapisan membran CO₂ dalam fase lipid mengakibatkan kerusakan struktur dan fungsi sel karena rusaknya rantai lipida. Hal ini akan semakin meningkatkan permeabilitas sel membran sehingga memudahkan CO₂ untuk masuk ke

dalam sitoplasma. Di dalam sitoplasma CO_2 berikatan dengan air dan membentuk ion HCO_3^- yang mengganggu proses metabolisme sel dan mengakibatkan kematian sel (Garcia-Gonzales et al., 2007).

Sementara itu, proses pengolahan pangan dengan teknologi sub atau superkritis CO_2 tidak mematikan semua jenis mikroba di dalam bahan, namun ada beberapa mikroba yang masih hidup atau dengan kata lain resisten terhadap proses CO_2 tekanan tinggi. Sel bakteri yang tidak mati oleh perlakuan CO_2 tekanan tinggi karena mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap perlakuan CO_2 tinggi pada kisaran 6,3MPa suhu 35°C dan 7,6MPa suhu 35°C atau dapat juga mengalami injury. Ketahanan mikroorganisme terhadap tekanan CO_2 tinggi dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya oleh senyawa kimia penyusun dinding sel dan dinding membran sel vegetatifnya, substrat dan senyawa penyusun substrat tempat mikroorganisme tumbuh, serta bentuk spora. Protein, lemak dan senyawa bioaktif tempe dapat berfungsi sebagai agensia pelindung mikroorganisme terhadap CO_2 tekanan tinggi. Sel yang membentuk spora lebih tahan terhadap CO_2 tekanan tinggi disebabkan penyusun dinding sel sporanya. Menurut Dillow et al. (2008), efektivitas kelarutan CO_2 di dalam produk pangan dipengaruhi oleh sifat matrik dan komponen penyusunnya, dimana efek CO_2 lebih tinggi di dalam matrik berbentuk cair dan sebaliknya matrik berbentuk padat menghambat difusitas CO_2 superkritis. Sementara itu, sel yang mengalami injury akan mampu tumbuh pada kondisi yang menguntungkan. Keasaman media pertumbuhan dapat menyebabkan terganggunya sistem biologi sel tetapi relatif tidak menyebabkan kematian karena keasaman yang ditimbulkan oleh efek CO_2 tekanan tinggi terlalu rendah untuk dapat menyebabkan kematian. Keadaan tersebut menurut dapat mengakibatkan sel mengalami injury.

Bakteri Gram positif tahan terhadap tekanan tinggi disebabkan oleh susunan dinding selnya. Dinding sel bakteri Gram positif sangat tebal dimana 90% dari dinding selnya terdiri dari lapisan peptidoglikan sedangkan lapisan lainnya adalah lapisan tipis asam teikoat. Peptidoglikan terdiri dari asam N-asetil muramat dan N-asetil glukosamin serta ikatan-ikatan asam amino yang kuat. Faktor tersebut menyebabkan bakteri Gram positif mempunyai ketahanan terhadap gangguan fisik yang tinggi. Bakteri Gram negatif mempunyai dinding sel yang tersusun atas lipopolisakarida di bagian luar dan lapisan tipis

peptidoglikan. Karbon dioksida superkritis mempunyai sifat hidrofobik dan dapat menembus dinding sel, melarutkan lapisan lipopolisakarida dan mengakibatkan kematian sel karena kerusakan dinding sel (Guo et al., 2011). Oleh karena itu, CO₂ superkritis dengan waktu 20 menit mempunyai efek disinfektansi selektif terhadap bakteri tempe karena difusitas yang tinggi dapat menembus dinding sel bakteri Gram negatif dan menyebabkan kematian, tetapi bakteri Gram positif lebih resisten terhadap efek difusivitas CO₂ superkritis tersebut sehingga tidak mengakibatkan semua yang tidak mati. Resistensi bakteri Gram positif disebabkan oleh adanya lapisan peptidoglikan dinding sel yang tebal. Komposisi medium atau bahan pangan tempat bakteri tumbuh dapat juga melindungi bakteri terhadap proses pengolahan CO₂ tekanan tinggi, misalnya makromolekul yang kompleks dalam bahan pangan, atau adanya senyawa bioaktif yang dapat meningkatkan resistensi bakteri terhadap gangguan fisik.

Penurunan jumlah kapang disebabkan oleh efek difusivitas CO₂ superkritis. Mekanisme kematian kapang dapat disebabkan oleh difusivitas CO₂ superkritis yang tinggi dan adanya efek ekstraksi. Kapang mempunyai dinding sel yang tersusun dari lapisan ganda fosfolipid dan glikoprotein (Madigan et al., 2012). Fosfolipid dan glikoprotein mengandung gugus fungsi yang bersifat polar dan non polar sehingga dapat berinteraksi dengan CO₂ tekanan tinggi. Hal ini mengakibatkan desintegrasi dinding sel miselium. Karbon dioksida superkritis mempunyai kemampuan menembus hingga lapisan membran sel kapang kemudian melarutkan lapisan dinding sel dan dinding sel membran dan mengakibatkan kerusakan struktur dan fungsi sel membran. Dinding sel kapang tersusun dari lapisan glikoprotein, β -glukan dan lapisan sel membran terdiri dari fosfolipid. Glikoprotein, β -glukan dan fosfolipid mempunyai gugus fungsi yang bersifat nonpolar sehingga terlarut di dalam CO₂ superkritis. Pada saat pelepasan tekanan terjadi proses throttling yang mengakibatkan sel kapang terekstraksi. Sementara itu, penurunan kapang akibat tekanan CO₂ superkritis (7,6MPa) lebih rendah karena perbedaan fase CO₂. Pada tekanan 6,3MPa dan suhu 25°C CO₂ dalam bentuk cair, karbon dioksida fase cair tidak mempunyai kemampuan menembus sel membran karena densitas CO₂ cair (0,6 hingga 1,6 kg/dm³) lebih tinggi dibanding CO₂ superkritis (0,2 hingga 0,9 kg/dm³) dan kelarutannya juga lebih rendah. Oleh karena itu, CO₂ cair hanya melarutkan sebagian senyawa

penyusunan dinding sel dan sel membran yang mempunyai gugus hidrofilik. Proses throttling tidak terjadi dalam CO₂ fase cair karena tidak terjadi penurunan tekanan secara drastis sehingga ekstraksi sel kapang tidak terjadi.

Dalam kaitannya dengan fase pertumbuhan mikroorganisme di dalam substrat, maka pada umumnya pertumbuhan sel pada fase stasioner lebih tahan terhadap panas dan tekanan dibanding sel pada pertumbuhan fase log. Sebagai contoh, pengolahan HPCD pada suhu 30°C dan tekanan CO₂ 6,9MPa, laju inaktivasi sel *L. plantarum* lebih tinggi ketika sel *L. plantarum* berada pada akhir fase log akhir dibanding sel pada fase stasioner. Disamping itu, pengolahan dengan CO₂ tekanan tinggi pada suhu lebih rendah dari suhu optimum pertumbuhan mikroba, menunjukkan peningkatan resistensi mikroba terhadap perlakuan dengan CO₂ bertekanan tinggi pada suhu 30°C dan tekanan 6,9 MPa dibandingkan pertumbuhan mikroba pada fase stasioner.

Modifikasi membran sel, Saat mendekati permukaan sel mikroba, cairan CO₂ dapat berdifusi ke dalam membran dan mungkin terakumulasi kedalam lapisan bagian dalam fosfolipid, selanjutnya CO₂ tersebut bisa terlarut dalam fosfolipid. Jumlah CO₂ yang terakumulasi dalam fase lipid mungkin menyebabkan sel membrane mengalami kerusakan secara struktural dan fungsional karena hilangnya urutan rantai lipid, yang dapat meningkatkan fluiditas membran. Penurunan pH intraseluler, karena terjadi peningkatan permeabilitas, maka CO₂ bertekanan, dengan mudah menembus melalui membran sel bakteri dan terakumulasi di dalam bagian interior sitoplasma sel bakteri. Di daerah tersebut, konsentrasi relatif dari kedua cairan CO₂ dan HCO₃⁻ segera dikendalikan oleh buffer pH internal sebagai hasil homeostasis pH agar dapat mempertahankan pH sitoplasma di atas atau di bawah konstan.

Efek penghambatan langsung CO₂ molekuler dan HCO₃⁻ pada metabolisme, Efek yang nyata dari HCO₃⁻ dan CO₂ terlarut adalah terhadap reaksi karboksilasi dan reaksi dekarboksilasi. Dalam kedua reaksi tersebut, CO₂ berperan baik pada biosintesis substrat dalam reaksi karboksilasi atau produk metabolik dari reaksi dekarboksilasi. Sejauh reaksi yang terjadi adalah dekarboksilasi, maka dekarboksilasi menghasilkan CO₂ dalam bentuk terlarut (*unhydrated*).

Gangguan keseimbangan elektrolit intraseluler, kerusakan membran pada sistem biologis sel mungkin bisa disebabkan ketika CO₂ bertekanan terakumulasi di dalam interior sitoplasma sel bakteri. Akumulasi CO₂ bertekanan mengkonversi HCO₃⁻ menjadi CO₃²⁻ yang dapat mengendapkan elektrolit anorganik intraseluler dari sel dan membran sel. Karena elektrolit anorganik ini membantu dalam menjaga hubungan osmotik antara sel dan media sekitarnya, hal ini bisa menghasilkan efek menyusut pada volume sel.

Pemindahan konstituen vital dari sel dan sel membrane, pertama kali CO₂ bertekanan menembus ke dalam sel untuk meningkatkan kepadatan hingga ke tingkat kritis dalam sel, setelah itu CO₂ bertekanan memindahkan konstituen intraseluler untuk mengganggu atau mengubah struktur bio-membran dan/atau keseimbangan sistem biologis, sehingga mendorong proses inaktivasi. Proses removal constituent sel distimulasi oleh pelepasan CO₂ bertekanan secara tiba tiba, dan mengakibatkan transfer komponen intraseluler. Laju inaktivasi dapat ditingkatkan dengan mengulangi pelepasan dan pengisian kembali CO₂ bertekanan di dalam bejana tekan selama perlakuan/proses.

Kandungan lemak dan karbohidrat dalam media atau dalam komponen matrik makanan menurunkan inaktivasi mikroba atau meningkatkan resistensi mikroba terhadap pengolahan dengan CO₂ tekanan tinggi. Lemak dan karbohidrat menurunkan laju penetrasi CO₂ tekanan tinggi. Hal ini mengakibatkan laju penetrasi CO₂ tekanan tinggi ke dalam sel mikroba menurun karena terjadi perubahan pada struktur dinding sel dan membrane yang mengandung lipida. Laju inaktivasi mikroba sangat dipengaruhi oleh konstituen dari media tempat tumbuh mikroba dan sifat makanan selama pengolahan dengan CO₂ tekanan tinggi. Laju inaktivasi menurun sangat nyata jika lingkungan fisikokimia makanan yang kompleks jika dibandingkan dengan system pada larutan sederhana.

Daftar Pustaka

Akonor, P.T., H. Ofori, N. T. Dziedzoave, and N. K. Kortei. (2016). Drying Characteristics and Physical and Nutritional Properties of Shrimp Meat as Affected by Different Traditional Drying Techniques, *International Journal of Food Science*, 2016, 1-5. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7879097>

- Asikin, A.N., S. Hutabarat, Ys. Darmanto, dan S. Budi Prayitno. (2014). Pathogenic Bacteria Content on Shrimp Windu (*Penaeus monodon* Fabricius) Post-harvested from Fish Pond. *J. Dinamika Pertanian*, XXIX (2):199-206.
- Brookmire, L., Mallikarjunan, P., Jahncke, M., & Grisso, R. (2013). Optimum Cooking Conditions for Shrimp and Atlantic Salmon. *Journal of Food Science*, 78(2). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12011>
- Dillow, A., Dehghani F., Hrkach, J.S., Foster, N.R., Langer, R. (2008). Bacterial inactivation by using near-and supercritical CO₂. *Proc Nat Acad Sci USA* 96: 10344-10348.
- Dorado-Rodelo, J. A., Ezquerro-Brauer, J. M., & Soto-Valdez, H. (2007). Effect of ovenproof plastic films on the quality of spotted rose snapper (*lutjanus guttatus*) fillets during frozen storage. *Packaging Technology and Science*, 20(5), 301–307. <https://doi.org/10.1002/pts.758>
- Illera, A. E., Sanz, M. T., Beltrán, S., & Benito-Román, O. (2019). Effect of High Pressure Carbon Dioxide on polyphenoloxidase from *Litopenaeus vannamei*. *LWT*, 109, 359–365. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.091>
- Jantakoson T., Kongkarn Kijroongrojana and Soottawat Benjakul. (2012). Effect of high pressure and heat treatments on black tiger shrimp (*Penaeus monodon* Fabricius) muscle protein. *International Aquatic Research*, 4 (19):1-12.
- Kustyawati M.E., Pratama F, Saputra D and Wijaya A. (2018). Viability of Molds and Bacteria in Tempeh Processed with Supercritical Carbon Dioxides during Storage. *International J of Food Science*, 26(8):1-7.
- Kustyawati ME, Pratama F, Rizal S., Fadhallah E.G. (2021). Quality and shelf-life of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) processed high pressure carbon dioxide (HPCD) at subcritical and supercritical state. *J of Food Quality*, dalam proses publikasi.
- Manheem, K., Benjakul, S., Kijroongrojana, K., Faithong, N., & Visessanguan, W. (2013). Effect of pre-cooking times on enzymes, properties, and melanosis of Pacific white shrimp during refrigerated storage. *International Aquatic Research*, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/2008-6970-5-1>
- Minh, N. P., Thi, T., Nhi, Y., Lap, T. T., Phong, Q. Van, Thi, H., & Kieu, T. (2019).

Quality of Frozen Black Tiger Shrimp (Penaeus monodon) under a Low-Density Polyethylene Bag Coextruded with Butylated Hydroxyanisole. 11(4), 1483–1486.

- Pinu, F.R. , Sabina Y , Md. Latiful B and M. M. Rahman. (2007). Microbiological condition of frozen shrimp in different food market of Dhaka city. *Food Sci. Technol. Res.*, 13(4):362-365.
- Sutiknowati, L. I. (2014). Kualitas perairan tambak udang berdasarkan parameter mikrobiologi. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 6(1): 157-170.

BAB 8. PERUBAHAN MUTU UDANG

Pendahuluan

Sebagai bahan pangan, udang mengalami perubahan mutu selama penyimpanan. Perubahan mutu udang sedapat mungkin diperlambat agar masih memiliki penerimaan yang baik oleh konsumen. Umur simpan produk pangan umumnya tergantung pada tingkat proliferasi bakteri pembusuk yang dicapai selama penyimpanan. Namun, pada udang bercak hitam atau black spot juga sebagai salah satu indikasi bahwa udang telah rusak atau tidak segar lagi. Timbulnya *black spot* karena terjadi keterlambatan proses penanganan awal, umumnya pembekuan. Kualitas dan kesegaran komoditas hasil perikanan dapat diperkirakan dengan menguji parameter mutu indikator kesegaran selama penyimpanan (Gulsun et al., 2009), diantaranya adalah Total Volatile Base Nitrogen (TVB-N), TMA, derajat keasaman/pH, jumlah mikroba, total lipid dan bilangan peroksida. Beberapa metode telah dikembangkan untuk menjaga mutu kualitatif dan untuk menghindari bahaya kesehatan bagi konsumen.

Pembekuan merupakan suatu cara pengawetan bahan pangan dengan cara membekukan bahan pada suhu di bawah titik beku pangan tersebut. Proses pembekuan akan menyebabkan kandungan air bahan akan berubah fase menjadi bentuk padat (es), sehingga kegiatan enzim dapat dihambat atau dihentikan sehingga dapat mempertahankan mutu bahan pangan. Pembekuan dapat mempertahankan rasa dan nilai gizi bahan pangan yang lebih baik daripada metode lain, karena pengawetan dengan suhu rendah (pembekuan) dapat menghambat aktivitas mikroba, mencegah terjadinya reaksi-reaksi kimia dan aktivitas enzim yang dapat merusak kandungan gizi bahan pangan (Frazier, 1978). Udang yang dibekukan terjadi pembentukan kristal-kristal es ekstraseluler dan intraseluler udang. Ketegaran (*firmness*) daging udang selama pembekuan akan menurun. Membran-membran sel di dalam daging udang selama pembekuan menjadi kaku, kemudian menyebabkan tertahannya aliran cairan antar sel sehingga membran sel pecah, dan cairan udang banyak yang keluar dari sel dan menyebabkan berkurangnya *firmness* daging udang. Kendala terhadap metode pembekuan antara lain Oleh karena itu pembekuan cepat memerlukan

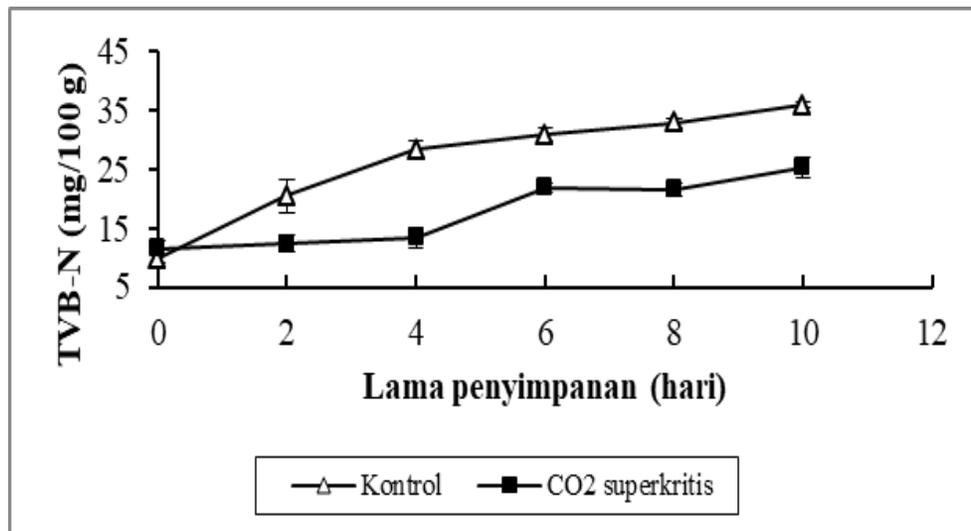
kontrol suhu pembekuan, kontrol suhu distribusi, dan teknik *thawing* daging udang yang tepat supaya tidak terjadi kerusakan fisik dan nutrisi pada udang.

Pada pengolahan udang menggunakan karbon dioksida bertekanan tinggi mempengaruhi ikatan hidrofobik dan ikatan non-kovalen diantara komponen molekul penyusun bahan pangan, tidak mempengaruhi ikatan kovalen namun memodifikasi ikatan kovalen tertentu, dan tidak mempengaruhi ikatan molekul yang membentuk senyawa citarasa (flavor), vitamin dan senyawa dengan berat molekul rendah. Oleh karena itu metode alternatif pengolahan tanpa panas *high pressure CO₂* dapat digunakan dalam pengolahan udang dengan tanpa merusak nilai gizi dan komponen bioaktif, namun memberikan keamanan produk dan mempertahankan citarasa sebagaimana yang diharapkan oleh konsumen.

Parameter Mutu Indikator Kesegaran Udang

Total Volatile Base Nitrogen (TVB-N)

Aktivitas mikrobiologis dan enzimatis pada udang selama penyimpanan tetap terjadi. Namun dalam kondisi suhu rendah aktivitas tersebut dapat diperlambat. Selama penyimpanan, aktivitas tersebut cenderung menurunkan kandungan protein akibat pemecahan protein menjadi senyawa turunannya yang menghasilkan aroma yang tidak sedap, seperti ammonia, dimetilamina, trimetilamina, dan komponen basa volatil berbasis nitrogen lainnya, dimana senyawa-senyawa tersebut dikenal sebagai Total Volatile Base Nitrogen. Nilai TVB-N pada udang *Litopenaeus vannamei* yang disimpan pada suhu 4°C semakin hari akan semakin meningkat, baik yang tidak diberi perlakuan maupun yang diberi perlakuan superkritis CO₂ (Gambar 10). Pengukuran nilai TVB-N dapat dijadikan indikator tingkat kesegaran udang maupun hasil laut lainnya dimana nilai ini juga akan berhubungan dengan nilai pH (Kustyawati et al., 2021). Nilai TVB-N dan nilai pH akan sama-sama meningkat tajam pada fase kebusukan akibat produksi senyawa basa volatile (Dabade et al., 2015; Khodazanary 2019), dan semakin tinggi nilai TVB-N menandakan semakin parahnya tingkat kerusakan protein tersebut yang dicirikan dengan timbulnya aroma yang tidak sedap.

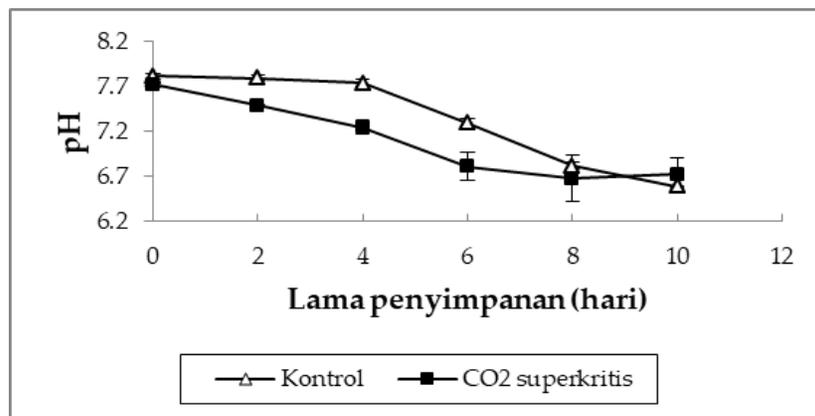


Gambar 11. Perubahan nilai TVB-N pada udang selama penyimpanan dingin (4°C).

Nilai TVB-N dapat diklasifikasikan berdasarkan penerimaan maupun mutunya. Nilai TVB-N yang diterima untuk udang kondisi segar adalah <12 mg N/100 g,, nilai dari 12-20 mg N/100 g masih dapat dikonsumsi namun sedikit mengalami dekomposisi, nilai 20-25 mg N/100 g merupakan batas aman konsumsi, dan nilai >25 mg N/100 g menandakan udang sudah mengalami kebusukan dan tidak boleh dimakan. Seperti yang disajikan pada Gambar 10, udang yang tidak diberi perlakuan CO₂ superkritis batas aman konsumsinya adalah pada penyimpanan selama 4 hari, dan pada udang dengan perlakuan CO₂ superkritis pada penyimpanan hari ke-10 menunjukkan kondisinya dalam batas aman konsumsi. Walaupun pada kedua perlakuan tersebut nilai TVB-N meningkat selama penyimpanan, adanya perlakuan CO₂ superkritis dapat memperpanjang daya simpan udang pada suhu 4°C. Aktivitas enzimatik yang masih berlangsung pada tubuh udang selama penyimpanan akan mendegradasi daging udang yang mengandung protein menjadi komponen basa volatil (Nirmal & Benjakul, 2011). Peningkatan kadar TVB-N dikarenakan oleh bertambahnya jumlah bakteri kontaminasi sehubungan dengan semakin berlanjutnya proses kemunduran mutu oleh mikroorganisme yang menghasilkan basa yang mudah menguap seperti amoniak.

Derajat Keasaman (pH)

Pengukuran perubahan nilai pH pada daging udang dapat dilakukan sebagai salah satu standar acuan untuk menilai kesegaran selama penyimpanan (Xu et al., 2019). Ketika udang dipanen dan mengalami kematian, udang akan berhenti bernafas. Glikogen dalam tubuh udang dipecah untuk menghasilkan zat asam seperti asam laktat, yang menyebabkan pH daging udang mengalami penurunan pada udang mulai mati hingga sebelum memasuki fase pembusukan. Kecepatan penurunan pH tergantung pada jumlah glikogen yang tersisa pada daging udang saat mati. Semakin banyak glikogen yang tersisa, maka penurunan pH dapat terjadi lebih lambat. Gambar 11 menunjukkan pola perubahan pH daging udang pada penyimpanan suhu 4°C.



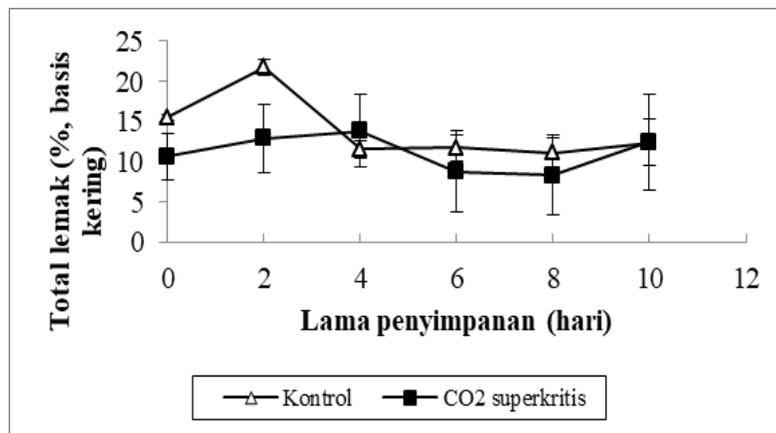
Gambar 12. Perubahan pH pada daging *Litopenaeus vannamei* selama penyimpanan suhu dingin (4°C).

Nilai pH daging udang menurun tajam dan datar setelah hari ke-6. Nilai pH awal udang 7,7 dan mencapai level terendah (6,6) pada hari ke 10 penyimpanan. Nilai pH udang segar umumnya berkisar pada nilai 6 (Jeyasanta et al., 2019), hal ini menunjukkan bahwa perlakuan awal dengan superkritis CO₂ tidak berpengaruh buruk terhadap kesegaran udang putih. Walaupun nilai pH berkisar pada 6,6-7,7 dan merupakan kondisi ideal untuk pertumbuhan mikroba, laju penurunan mutu mungkin diperlambat karena pengaruh suhu penyimpanan yang rendah (4°C). Kenaikan nilai pH pada daging udang setelah kematian dapat mengindikasikan permulaan fase pembusukan. Peningkatan pH pada daging udang terlihat ketika protein, asam amino, dan zat yang mengandung nitrogen pada udang diubah

menjadi bahan dasar seperti amonia, trimetilamina, indol, dan histamin oleh enzim dan aktivitas mikroorganisme selama kerusakan (Xu et al. 2019).

Lemak dan Bilangan Peroksida

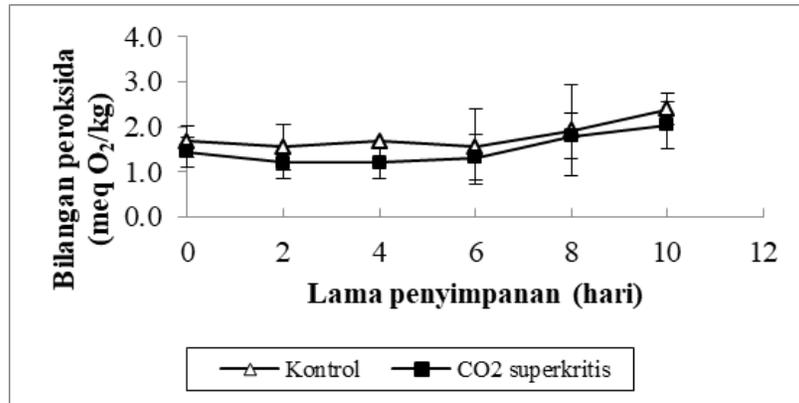
Komoditas hasil perikanan umumnya kaya akan kandungan lemak tak jenuh seperti asam lemak omega-3 (Okpala 2016; Sae-law & Benjakul 2014), namun kondisi ini menjadikan mereka rentan akan kerusakan pada lemak, yaitu terjadinya oksidasi lemak. Selain itu kandungan lemak pada udang dapat mengalami perubahan akibat pemecahan lemak menjadi asam lemak bebas yang dapat disebabkan oleh proses hidrolisis maupun aktivitas enzim lipase yang berasal dari pencernaan udang (Rivera-Perez et al., 2011). Tingkat kerusakan produk dari sisi kandungan lemak selain dapat diketahui melalui pengukuran asam lemak bebas, juga dapat diketahui melalui uji bilangan peroksida. Bilangan peroksida mengindikasikan tingkat kerusakan oksidatif dari lemak dimana nilai bilangan peroksida yang tinggi merefleksikan kenaikan pembentukan hidrogen peroksida sebagai produk utama oksidasi (Gordon, 2004; Kong & Singh, 2011). Gambar 12 dan 13 menunjukkan jumlah total lemak dan bilangan peroksida udang pada penyimpanan suhu 4°C.



Gambar 13. Perubahan total lemak pada udang selama penyimpanan suhu dingin (4°C)

Penerapan teknologi CO₂ superkritis tidak mempengaruhi perubahan lemak dan bilangan peroksida secara signifikan, namun seiring lamanya penyimpanan nilai bilangan peroksida cenderung meningkat walaupun tidak signifikan (Minh et al. 2019; Tappi et al.

2020; Johnson & Decker 2015; Li et al. 2020). Perubahan bilangan peroksida pada penyimpanan dingin dari udang black tiger juga tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Kondisi lain yang dapat mempengaruhi perubahan kandungan lemak selama penyimpanan udang adalah suhu penyimpanan, keberadaan oksigen, dan cahaya.



Gambar 14. Perubahan bilangan peroksida udang selama penyimpanan suhu dingin (4°C).

Pada suhu yang lebih tinggi terjadi peningkatan aktivitas enzim lipase yang menyebabkan laju hidrolisis lemak meningkat. Enzim ini akan memecah lemak atau trigliserida menjadi tiga asam lemak bebas dan gliserol, sehingga menghasilkan penurunan nilai lemak dan peningkatan dari asam lemak bebas pada akhir penyimpanan. Kandungan asam lemak dari udang mantis secara signifikan meningkat di akhir penyimpanan. Semakin tinggi nilai asam lemak bebas maka akan menimbulkan penyimpangan flavor dan mengindikasikan telah terjadinya tingkat kerusakan lipid yang lebih tinggi. Oksigen dengan mudah berinteraksi dengan asam lemak tak jenuh yang bertanggung jawab pada oksidasi lemak atau ketengikan oksidatif. Kondisi penyimpanan udang pada suhu yang lebih tinggi dengan adanya cahaya matahari dapat meningkatkan bilangan peroksida. Keberadaan cahaya mempercepat oksidasi lemak pada proses fotooksidasi. Selama proses tersebut energi cahaya matahari diserap dan berubah menjadi kelompok radikal bebas, oksigen triplet menjadi oksigen singlet yang dengan mudah bereaksi dengan asam lemak tak jenuh dan menghasilkan hidrogen peroksida (Chang 2011).

TMAO secara alami terdapat pada serat daging hewan perairan. Jika hewan perairan mengalami kematian maka TMAO tereduksi menjadi TMA akibat adanya aktivitas enzim.

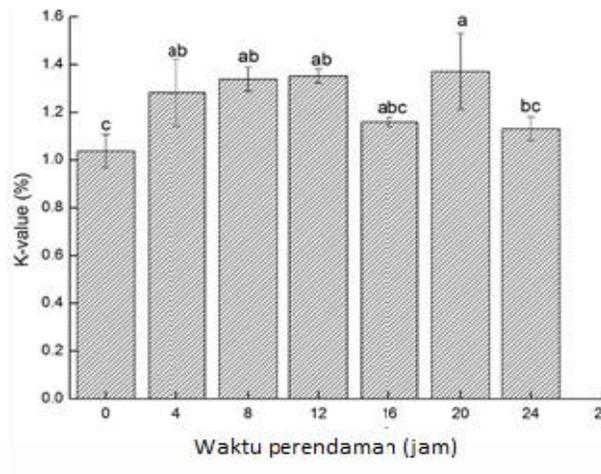
Reaksi ini berperan penting dalam pembusukkan hasil perikanan yang disebabkan oleh bakteri. TMA merupakan salah satu senyawa volatil yang dapat dijadikan indikator kesegaran hewan perairan. Nilai TMA-N tertinggi dari alur proses rantai dingin udang vaname yaitu 3,75 mg N/100g kemudian berangsur angsur menurun hingga akhir proses (*freezing*). Banyak ahli berpendapat batasan kesegaran hasil perikanan yang dinilai dengan uji TMA yaitu 5 mgN/100g daging (Montgomery et al., 1970). Menurut Suwetja (2011) TMA akan terhambat pembentukannya pada hasil perikanan apabila dibekukan akan tetapi menurut Hebard et al. (1982), TMA tidak dapat terbentuk dalam kadar yang cukup pada reaksi enzimatik, sama halnya dengan pembentukan DMA dan FA. Pada penelitian Goncalves & Gindri (2009) pada sampel *Xiphopenaeus kroyeri* senyawa trimetilamin tidak terbentuk pada penyimpanan beku, akan tetapi senyawa dimetilamin dapat membentuk dua kali lipat senyawa trimetilamin setelah 50 hari penyimpanan beku. Meningkatnya kadar TVB-N disebabkan oleh enzim proteolitik menjadi asam karboksilat, asam sulfida, ammonia maupun jenis asam lain. TVB-N mudah larut dan terdiri dari senyawa-senyawa yang mudah menguap. Meningkatnya nilai TVB disebabkan adanya nukleotida yang mentransfer ATP sehingga berperan dalam penambahan jumlah ammonia dan volatil amin.

Perubahan ATP udang

AMP dan IMP adalah produk degradasi ATP dan merupakan dua senyawa terpenting yang mempengaruhi rasa daging udang. Kedua nukleotida ini bertanggung jawab atas rasa gurih, segar, rasa manis daging udang. Ada dua jalur degradasi ATP pada udang setelah mati. Pertama adalah $ATP \rightarrow ADP \rightarrow AMP \rightarrow IMP \rightarrow HxR \rightarrow Hx$, dan kedua adalah $ATP \rightarrow ADP \rightarrow AMP \rightarrow AdR \rightarrow HxR \rightarrow Hx$. Peningkatan waktu perendaman sampel Udang Putih Pasifik dalam air es, ATP, ADP, dan AMP umumnya menurun, sedangkan kadar IMP meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa ATP dengan cepat didegradasi menjadi AMP melalui ADP oleh aktivitas enzim selama perendaman udang dalam air es. AMP dipecah menjadi IMP oleh AMP deaminase. IMP adalah zat perisa kuat yang ditemukan pada udang dan bila ada dalam konsentrasi tinggi, maka akan berkaitan dengan kualitas citarasa daging udang yang intense. Peningkatan nilai HxR disebabkan oleh dephosphorylation IMP oleh aktivitas enzim 5'-nukleotidase. Penurunan kandungan HxR

mungkin karena adanya metabolit yang diproduksi oleh proliferasi udang selama penyimpanan dan interaksi enzim endogen untuk mendorong degradasi HxR (Xu, et al., 2019). Nilai K adalah suatu produk yang dihasilkan oleh disintegrasi nukleotida dan digunakan sebagai indeks untuk menentukan perubahan kesegaran ikan. Ikan makin segar jika nilai K kecil dan sebaliknya nilai K yang lebih besar menunjukkan penurunan kesegaran. Nilai K untuk ikan segar berada di bawah 20%, nilai K pada rentang 20% ~ 40% mencerminkan kesegaran sekunder, dan pada rentang 60% ~ 80% menunjukkan tahap awal kerusakan ikan. Gambar 14 menunjukkan peningkatan awal pada nilai K dan diikuti penurunan. Perubahan nilai K ini konsisten dengan pola perubahan HxR dan Hx. Nilai K di bawah 2%, menunjukkan bahwa udang memiliki kesegaran kelas satu.

$$\text{Nilai } K = \frac{(HxR) + (Hx)}{(ATP) + (ADP) + (AMP) + (IMP) + (HxR) + (Hx)} \times 100\%$$



Gambar 15. Perubahan nilai K udang putih selama perendaman dalam air es
 Sumber: Xu et al. (2019)

Pengolahan dengan Pemanasan

Pemanasan merupakan proses pengolahan pangan dalam upaya mengawetkan makanan. Pengolahan bahan pangan merupakan perubahan bentuk asli kedalam bentuk yang mendekati bentuk untuk dapat segera dimakan. Pemanasan dikenal dengan proses

pemasakan yaitu proses pemanasan bahan pangan dengan suhu 100°C atau lebih dengan tujuan utama adalah memperoleh rasa yang lebih enak, aroma yang lebih baik, tekstur yang lebih lunak, untuk membunuh mikrobia dan menginaktifkan semua enzim. Pemasakan dapat dilakukan dengan perebusan dan pengukusan (*boiling* dan *steaming* pada suhu 100°C), *broiling* (pemanggangan daging), *baking* (pemanggangan roti), *roasting* (pengsangraian) dan *frying* (penggorengan dengan minyak) dengan suhu antara 150- 300°C. Penggunaan panas dalam proses pemasakan sangat berpengaruh pada nilai gizi bahan pangan tersebut.

Proses pengolahan udang dengan panas dapat mengakibatkan kerusakan pada protein, senyawa bioaktif dan kinerja enzim udang. Proses pemasakan bahan pangan dengan menggunakan panas menyebabkan penurunan kadar zat gizi bahan pangan tersebut dibandingkan bahan mentahnya. Tinggi atau rendahnya penurunan kandungan gizi suatu bahan pangan akibat pemasakan tergantung dari jenis bahan pangan, suhu yang digunakan dan lamanya proses pemasakan. Proses menggoreng menyebabkan penurunan kandungan gizi yang sangat signifikan karena penggorengan menggunakan suhu yang tinggi sehingga zat gizi seperti protein mengalami kerusakan. Sedangkan proses perebusan menyebabkan berkurangnya kandungan zat gizi karena banyak zat gizi terlarut dalam air rebusan. Semua cara masak atau pengolahan makanan juga dapat mengurangi kandungan gizi makanan. Secara khusus, memaparkan bahan makanan kepada panas yang tinggi, cahaya, dan atau oksigen akan menyebabkan kehilangan zat gizi yang besar pada makanan. Zat gizi juga dapat tercuci keluar oleh air yang digunakan untuk memasak. Proses pemasakan dengan menggoreng termasuk paling sering dilakukan. Suhu menggoreng biasanya mencapai 160°C, oleh karena itu sebagian zat gizi diperkirakan akan rusak, diantaranya vitamin dan protein. Penurunan mineral berkisar antara 5-40%, terutama kalsium, yodium, seng, selenium dan zat besi. Penanganan udang mulai dari pemanenan dan selama pengolahan harus mampu menekan kandungan mikroorganisme yang ada pada udang, sehingga dapat menghambat laju kerusakan mutunya.

Daftar Pustaka

- Chang, H. H. (2011). Quantitative Changes of Volatile Compound in Soybean and Algal Oil and Effects of Antioxidants on the Oxidative Stability of Algal Oil under Light Storage. The Ohio State University.
- Dabadé, D.S., Den Besten, H.M W., Azokpota, P., Nout, M.J R., Hounhouigan, D.J., Zwietering, M.H. (2015). Spoilage evaluation, shelf-life prediction, and potential spoilage organisms of tropical brackish water shrimp (*Penaeus notialis*) at different storage temperatures. *Food Microbiol.*, 48, 8–16.
- Frazier, W.C. (1978). *Food Microbiology*. New Delhi: Tata Mc Graw-Hill Publishing Co. Ltd.
- Goncalves, A.A, Gindri, C.S.G. (2009). The effect of glaze uptake on storage quality of frozen shrimp. *Journal of Food Engineering*, 90, 285-290.
- Gordon, M. H. (2004). Factors affecting lipid oxidation. In *Understanding and Measuring the Shelf-Life of Food*. Woodhead Publishing Limited.
- Gulsun, O., Esmeray, K., Serhat, O., & Fatih, O. (2009). Sensory, microbiological and chemical assessment of the freshness of red mullet (*Mullus barbatus*) and goldband goatfish (*Upeneus moluccensis*) during storage in ice. *Food Chem*, 114, 505-510.
- Hebard, C. E., Flick, G. J. and Martin, R. E. (1982). Occurrence and significance of trimethylamine oxide and its derivatives in fish and shellfish. In *Chemistry and Biochemistry of Marine Food Products* (ed. R. E. Martin, G. J. Flick, C. E. Hebard and D. R. Ward), pp. 149–304. Westport, CT: AVI Publishing Company.
- Jeyasanta, I., Sathish, N., & Patterson, J. (2019). Microbiological, biochemical and organoleptic quality of marine shrimp ready-to-eat (RTE) value added products purchased from Self Help Group. *Food Nutr Open Access*, 2, 1–7.
- Johnson, D. R., & Decker, E. A. (2015). The role of oxygen in lipid oxidation reactions: A review. *Annual Review of Food Science and Technology*, 6, 171–190.
- Khodanazary, A. (2019). Freshness assessment of shrimp *Metapenaeus affinis* by quality index method and estimation of its shelf life. *International Journal of Food*

- Kong, F., & Singh, R. P. (2011). Advances in instrumental methods to determine food quality deterioration. In *Food and Beverage Stability and Shelf Life*. Woodhead Publishing Limited.
- Kustyawati ME, Pratama F, Rizal S., Fadhallah E.G. (2021). Quality and shelf-life of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) processed high pressure carbon dioxide (HPCD) at subcritical and supercritical state. *J of Food Quality*, dalam proses publikasi.
- Li, D. Y., Yuan, Z., Liu, Z. Q., Yu, M. M., Guo, Y., Liu, X. Y., Zhou, D. Y. (2020). Effect of oxidation and maillard reaction on color deterioration of ready-to-eat shrimps during storage. *LWT*, 131, 109696.
- Minh, N. P., Thi, T., Nhi, Y., Lap, T. T., Phong, Q. Van, Thi, H., & Kieu, T. (2019). Quality of Frozen Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*) under a Low-Density Polyethylene Bag Coextruded with Butylated Hydroxyanisole. *11*(4), 1483–1486.
- Montgomery, W.A., Sidhu, G.S. & Vale, G.L. (1970): The Australian prawn industry. 1. Naturalresources and quality aspects of whole cooked fresh prawns and frozen prawn meat. *CSIRO Fd Preserv.Quart.*, 30, 21–27.
- Nirmal, N. P., Benjakul, S. (2011). Retardation of quality changes of pacific white shrimp by green tea extract treatment and modified atmosphere packaging during refrigerated storage. *Int. J. Food Microbiol.*, 149, 247–253.
- Okpala, C.O.R. (2016). Lipid autoxidation in ozone-processed crustacea under cold storage: A treatise. *Lipid Technology*, 28, 93-95.
- Rivera-Pérez, C., García-Carreño, F. L., & Saborowski, R. (2011). Purification and biochemical characterization of digestive lipase in whiteleg shrimp. *Marine Biotechnology*, 13, 284–295
- Sae-leaw, T., & Benjakul, S. (2014). Fatty acid composition, lipid oxidation and fishy odour development in seabass (*Lates calcarifer*) skin during iced storage. *European Journal of Lipid Science and Technology* 116, 885-894.
- Suwetja IK. (2011). *Biokimia Hasil Perikanan*. Jakarta: Media Prima Aksara.
- Tappi, S., Pinheiro, A. C. D. A. S., Mercatante, D., Picone, G., Soglia, F., Rodriguez-Estrada, M. T., Rocculi, P. (2020). Quality changes during frozen storage of

mechanical-separated flesh obtained from an underutilized crustacean. *Foods*, 9, 1485.

Xu, N., Shi, W., Wang, X., & Wang, Z. (2019). Effect of ice water pretreatment on the quality of Pacific White Shrimps (*Litopenaeus vannamei*). *Food Science & Nutrition*, 7, 645–655.

BIBLIOGRAFI

Astaxanthin yaitu salah satu karotenoid, pigmen alami pemberi warna merah atau merah muda, berasal dari beberapa jenis algae dan hewan air seperti udang, dan lobster.

CO₂ superkritis yaitu suatu fase fluida CO₂ dimana CO₂ berada pada atau di atas titik kritis CO₂. Pada umumnya CO₂ berbentuk gas di udara pada suhu dan tekanan standard/normal. CO₂ berada dalam fase padat dan disebut sebagai dry ice (es kering) jika berada di bawah suhu -56,6°C dan tekanan 5,11 atm.

CO₂ subkritis yaitu suatu fase CO₂ dimana CO₂ berada di daerah di bawah titik kritis (31,1°C dengan tekanan 7,4MPa). CO₂ yang berada di daerah subkritis berupa fluida CO₂ cair.

High pressure carbon dioxide (HPCD) yaitu teknologi tanpa panas dimana makanan tidak terpapar pada panas, karena CO₂ berada di atas titik kritis pada suhu 31,1°C dengan tekanan 7,4 MPa.

Miselium yaitu bagian sel vegetative dari kapang, terdiri atas kumpulan benang benang hifa. Hifa adalah filament benang yang terdiri dari sel sel kapang.

Titik kritis CO₂ yaitu titik dimana CO₂ berada pada suhu kritis (31,1°C) dan tekanan kritis (7,4 MPa), di atas titik tersebut CO₂ berubah menjadi fluida dan region atau daerah di atas titik kritis disebut daerah superkritis.

Mikrostruktur yaitu susunan suatu matrik, jaringan, atau sel yang berukuran mikro atau hanya dapat diamati menggunakan alat bantu mikroskop elektron.

SEM (*Scanning electron microscope*) yaitu suatu tipe mikroskop elektron yang menghasilkan gambar sampel dengan memindai permukaan dengan tembakan elektron yang terfokus. Elektron berinteraksi dengan atom di dalam sampel, menghasilkan variasi signal yang mengandung informasi mengenai permukaan topografi dan komposisi sampel.

Psi (*per square inch*) adalah satuan kekuatan tekanan per inchi persegi. 1 psi = 6894,76 Pascal = 0,068046 Atmosphere = 0,0689476 Bar.

Denaturasi yaitu kerusakan struktur protein sekunder, tersier, dan kuartener oleh senyawa denaturan akibat rusaknya ikatan hydrogen, interaksi hidrofobik, ikatan garam, dan

terbukanya lipatan molekul protein tetapi belum terjadi pemutusan ikatan kovalen (ikatan peptide).

Denaturasi parsial protein meningkatkan daya cerna dan ketersediaan biologisnya, mengaktivasi enzim.

Omega-3 adalah jenis asam lemak tidak jenuh dengan 3 buah ikatan rangkap, (docosahexaeniac/DHA).

Polaritas atau kepolaran yaitu pemisahan muatan listrik suatu molekul atau gugus kimia yang memiliki momen listrik dipole atau multipol.

Pirazin yaitu suatu senyawa organik aromatik heterosiklik dengan formula kimia $C_4H_4N_2$.

Fluida yaitu suatu zat yang mengalir atau zat yang bisa mengalami perubahan bentuk terus menerus bila terkena tekanan. Fluida mencakup zat cair, gas, air dan udara