ANALISIS GUGUS FUNGSI PADA PROSES KEBUSUKAN DAGING IKAN AIR TAWAR MENGGUNAKAN SPEKTROSKOPI FTIR DAN METODE PCA

SKRIPSI

Oleh :
LATHIFATUZ ZAHROH
NIM. 210604110041

PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025

ANALISIS GUGUS FUNGSI PADA PROSES KEBUSUKAN DAGING IKAN AIR TAWAR MENGGUNAKAN SPEKTROSKOPI FTIR DAN METODE PCA

SKRIPSI

Diajukan Kepada :
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)

Oleh :
LATHIFATUZ ZAHROH
NIM. 210604110041

PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
2025

HALAMAN PERSETUJUAN
SKRIPSI

ANALISIS GUGUS FUNGSI PADA PROSES KEBUSUKAN DAGING IKAN AIR TAWAR MENGGUNAKAN SPEKTROSKOPI FTIR DAN METODE PCA

SKRIPSI

Oleh :
LATHIFATUZ ZAHROH
NIM. 210604110041

Telah Diperiksa dan Disetujui Untuk Diuji
Pada tanggal 5 Juli 2025

Dosen Pembimbing I	**Dosen Pembimbing II**
Dr. Imam Tazi, M.Si	Dr. Umaiyatus Syarifah, MA
NIP. 197407302003121002	NIP. 198209252009012005

Mengetahui,
Ketua Program Studi

Dr. Imam Tazi, M.Si
NIP. 197407302003121002

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS GUGUS FUNGSI PADA PROSES KEBUSUKAN DAGING IKAN AIR TAWAR MENGGUNAKAN SPEKTROSKOPI FTIR DAN METODE PCA

SKRIPSI

Oleh :
LATHIFATUZ ZAHROH
NIM. 210604110041

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarja Sains (S.Si)
Pada Tanggal 17 Juli 2025

Penguji Utama	Farid Samsu Hananto, M.T NIP. 19740513 200312 1 001	
Ketua Penguji	Utiyah Hikmah, M.Si NIP. 19880605 202321 2 054	
Sekretaris Penguji	Dr. Imam Tazi, M.Si NIP. 19740730 200312 1 002	
Anggota Penguji	Dr. Umaiyatus Syarifah, MA NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi

Dr. Imam Tazi, M.Si
NIP. 197407302003121002

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama	: LATHIFATUZ ZAHROH
NIM	: 210604110041
Program Studi	: FISIKA
Fakultas	: SAINS DAN TEKNOLOGI
Judul Penelitian	: Analisis Gugus Fungsi Pada Proses Kebusukan Daging Ikan Air Tawar Menggunakan Spektroskopi Ftir Dan Metode PCA

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Malang, 5 Juli 2025
Yang Membuat Pernyataan

Lathifatuz Zahroh
NIM. 210604110041

MOTTO

"لَا تَقْنَطُواْ مِن رَّحْمَةِ ٱللَّه"

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan *Alhamdulillahi rabbil 'alamin* sebagai ungkapan syukur. Skripsi ini penulis persembahkan kepada seluruh keluarga penulis, khususnya kedua orang tua tercinta, Bapak Moh Shokib dan Ibu Lutfatul Khoiriyah serta saudara Penulis, Maulidiyatul Muniroh, Burhanudin R, Laili Sukhbatul dan Moh Fawaid yang telah senantiasa memberikan kasih sayang, doa, dukungan moral dan material, serta pengorbanan yang tiada henti dalam setiap langkah penulis.

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penyusunan draft skripsi yang berjudul "Analisis Gugus Fungsi pada Proses Kebusukan Daging Ikan Air Tawar Berbasis Spektroskopi FTIR dan Metode PCA" dapat diselesaikan. Sholawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan kepada junjungan kita Nabi agung Muhammad SAW., yang telah membawa kita dari masa kegelapan menuju masa cahaya terang Islam, yakni Addinul Islam.

Skripsi ini dibuat oleh penulis untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana Fisika dari Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan draft skripsi ini tidak akan selesai tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. H. M. Zainuddin, M.A., selaku rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
2. Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si, selaku dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Imam Tazi, M.Si, selaku ketua Program Studi Fisika, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, seta sebagai dosen pembimbing yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan, motivasi dan meluangkan waktunya untuk membimbing penulis selama proses penyusunan skripsi dengan baik.
4. Dr. Umaiyatus Syarifah, MA selaku dosen pembimbing II.
5. Seluruh dosen, laboran dan admin Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim
6. Kedua orang tua penulis, Ayah Shokhib dan ibuk Lutfatul, saudara penulis Maulidiyatul, Burhanuddin Laili dan Fawaid serta semua keluarga yang telah memberikan dukungan moral dan material serta doa disetiap langkah penulis.

7. Ustadz Sobah dan Ustadzah Jauharo selaku orang tua kedua penulis ditanah rantau yang senantiasa membimbing dan mendoakan penulis.
8. Seluruh teman terdekat penulis, Alimatur Rosyadah, Anisah Frida, Risky Muamanah, Devi Cindy, Reza Anbel yang senantiasa hadir, memberikan dukungan dan selalu mendengarkan keluh kesah penulis.
9. Seluruh penghuni kamar FAZA2, Aulia Cahya, Shofa dan Nanda Rahmaning yang tidak ada bosannya memberikan semangat dan menghibur penulis, serta seluruh teman-teman Ponpes Al Barokah Malang.
10. Segenap teman-teman Fisika angkatan 2021 UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.
11. Serta semua pihak yang telah berkenan memberikan bantuan dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai, yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini, penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan serta kesalahan. Maka dari itu penulis mengharapkan segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Demikian yang dapat penulis sampaikan, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan menambah pengetahuan bagi orang lain.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGAJUAN ii
HALAMAN PERSETUJUAN ..... Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
HALAMAN PENGESAHAN ..... Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN ..... Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
MOTTO……. vi
HALAMAN PERSEMBAHAN.....vii
KATA PENGANTAR.....viii
DAFTAR ISI xi
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xiv
ABSTRAK…. xv
ABSTRACT.. xvi
الملخص…… xvii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang.....1
1.2 Rumusan Masalah.....6
1.3 Tujuan Penelitian.....6
1.4 Manfaat Penelitian.....6
1.5 Batasan Masalah.....6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 8
2.1 Landasan Teori 8
2.1.1 Ikan Air Tawar.....8
2.1.2 Komposisi Proksimat dan Gugus Fungsi pada Daging Ikan.....13
2.1.3 Proses Pembusukan dan Kemunduran Mutu ikan.....17
2.1.4 Spektroskopi FTIR.....22
2.1.5 *Principal Component Analysis* (PCA) 27
2.1.6 Kesegaran Ikan dalam Prespektif Islam.....31
BAB III METODE PENELITIAN 32
3.1 Jenis Penelitian.....32
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian.....32
3.3 Alat dan Bahan Penelitian 32
3.3.1 Alat Penelitian.....32
3.3.2 Bahan Penelitian.....33
3.4 Prosedur Kerja.....33
3.5 Preparasi Sampel.....34
3.6 Analisis Data 34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....36
4.1 Preparasi Sampel 36
4.2 Hasil Pengujian Sampel Menggunakan FTIR 37
4.2.1 Analisis Hasil FTIR Sampel Daging Lele 0 Jam 42

4.2.2 Analisis Hasil FTIR Sampel Daging Lele 12 Jam 44
4.2.3 Analisis Hasil FTIR Sampel Daging Lele 24 Jam 46

4.2.4 Analisis Hasil FTIR Sampel Daging Lele 36 Jam 49
4.3 Analisis Hasil Pengolahan Data dengan Metode PCA.....50
4.3.1 Hasil Scree Plot.....52
4.3.2 Hasil Score Plot *2D*.....53
4.3.3 Hasil Loading Plot.....54
4.3.4 Hasil Scatter Plot *3D*.....56
4.3.5 Hasil Analisis Perbandingan Sampel 56
4.4 Kajian Integrasi Islam.....58
BAB V PENUTUP.....54
5.1 Kesimpulan.....54
5.2 Saran….....55
DAFTAR PUSTAKA.....56
LAMPIRAN 60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Bagian Tubuh Ikan Secara Morfologi 8
Gambar 2. 2 Letak mulut ikan sesuai habitat (Terminal dan Subterminal) 9
Gambar 2. 3 Variasi sungut ikan 9
Gambar 2. 4 (A)sikloid (B)stenoid 10
Gambar 2. 5 Lima jenis sirip pada ikan gabus 11
Gambar 2. 6 Garis batas iktiogeografi di kepulauan Indonesia 13
Gambar 2. 7 Prinsip kerja spektroskopi FTIR 25
Gambar 2. 8 Michelson Interferometer 26
Gambar 2. 9 Gelombang yang dihasilkan dari pengukuran FTIR 26
Gambar 2. 10 Analisis komponen utama (PCA) 28
Gambar 4. 1 Sampel Daging Lele 36
Gambar 4. 2 Grafik Spektrum FTIR pada 4 Sampel 38
Gambar 4. 3 Spektrum FTIR Pada Sampel 0 Jam 42
Gambar 4. 4 Spektrum FTIR Pada Sampel 12 Jam 44
Gambar 4. 5 Spektrum FTIR Pada Sampel 24 Jam 46
Gambar 4. 6 Spektrum FTIR Pada Sampel 0 Jam 49
Gambar 4. 7 Scree Plot Sampel 52
Gambar 4. 8 Score Plot Sampel 53
Gambar 4. 9 Biplot Sampel 54
Gambar 4. 10 Scatter Plot Sampel 56

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Tabel Gugus Fungsi dan Bilangan Gelombang..... 39
Tabel 4. 6 Nilai Analisis Eigen Matriks Korelasi 51

ABSTRAK

Zahroh, Lathifatuz, 2025. **Analisis Gugus Fungsi Pada Proses Kebusukan Daging Ikan Air Tawar Menggunakan Spektroskopi Ftir Dan Metode PCA.** Skripsi. Prodi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Dr. Imam Tazi, M.Si (II) Dr. Umaiyatus Syarifah, MA.

Kata kunci : Proses Kebusukan Ikan, Gugus Fungsi, Spektroskopi FTIR, Metode PCA

Kesegaran ikan air tawar merupakan faktor penting dalam menjamin kualitas, keamanan, dan nilai gizi produk perikanan. Seiring waktu, ikan mengalami proses pembusukan yang ditandai dengan perubahan senyawa kimia penyusunnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan gugus fungsi kimia selama proses pembusukan daging ikan lele (Clarias sp.) menggunakan teknologi *Spektroskopi Fourier Transform Infrared* (FTIR) serta mengklasifikasikan perbedaannya berdasarkan waktu penyimpanan dengan metode *Principal Component Analysis* (PCA). Sampel ikan diamati pada waktu 0, 12, 24, dan 36 jam pada suhu ruang. Spektrum FTIR menunjukkan perubahan intensitas pada beberapa gugus fungsi penting, seperti C=O (amida I dan aldehid), N–H (amida II), dan C–H alkana, yang menunjukkan degradasi protein dan oksidasi lipid. Hasil analisis PCA memperlihatkan pemisahan yang jelas antar waktu penyimpanan dengan kontribusi komponen utama (PC1 dan PC2) sebesar 63,1% dan 26,2% sehingga didapatkan nilai komulatif sebesar 89,3. Studi ini menunjukkan bahwa kombinasi FTIR dan PCA efektif dalam menganalisis perubahan kimiawi selama proses pembusukan ikan air tawar.

ABSTRACT

Zahroh, Lathifatuz, 2025. Analysis of Functional Groups in the Decay Process of Freshwater Fish Meat Using FTIR Spectroscopy and the PCA Method. Thesis. Physics Study Program, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University Malang. Supervisor: (I) Dr. Imam Tazi, M.Si (II) Dr. Umaiyatus Syarifah, MA.

Kata kunci : Fish spoilage, Functional groups, FTIR spectroscopy, PCA method.

Freshness is a key factor in maintaining the quality, safety, and nutritional value of freshwater fish. As time goes by, fish begin to spoil, marked by changes in their chemical compounds. This study aims to analyze the changes in functional chemical groups during the spoilage of catfish meat (Clarias sp.) using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy and to classify the changes based on storage time using the Principal Component Analysis (PCA) method. Observations were carried out on fish samples stored at room temperature for 0, 12, 24, and 36 hours. The FTIR spectral data showed changes in the intensity of several key functional groups such as C=O (amide I and aldehyde), N-H (amide II), and C-H alkane, which reflect protein degradation and lipid oxidation. PCA results revealed a clear separation between the different storage durations, with the first two principal components (PC1 and PC2) contributing 63.1% and 26.2%, respectively giving a total variance of 89.3%. These results suggest that the combination of FTIR and PCA is effective in identifying chemical changes during the spoilage process of freshwater fish.

الملخص

زهرة، لطيفة الزهراء، ٢٠٢٥. تحليل المجموعات الوظيفية في عملية تعفن لحم السمك العذب باستخدام مطيافية FTIR وطريقة PCA. البحث العلمي، قسم التعليم الفيزياء، بكلية العلوم و التكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف ١) الدكتور إمام تازي الماجستير ٢) الدكتورة أميّة الشريفة الماجستيرة.

الكلمات المفتاحية : عملية تعفن السمك، مجموعة الوظائف، مطيافية FTIR، طريقة PCA

إن نضارة أسماك المياه العذبة عامل مهم في ضمان جودة المنتجات السمكية وسلامتها وقيمتها الغذائية. مع مرور الوقت، تتعرض الأسماك لعملية تحلل تتميز بتغيرات في المركبات الكيميائية المكونة لها .تهدف هذه الدراسة إلى تحليل التغيرات في المجموعات الوظيفية الكيميائية خلال عملية تحلل لحم سمك السلور (Clarias sp.) باستخدام تقنية Spektroskopi Fourier Transform Infrared (FTIR)وتصنيف الفروق بناءً على مدة التخزين باستخدام طريقة Principal Component Analysis (PCA)تمت مراقبة عينات السمك في الأوقات 0، 12، 24، و 36 ساعة في درجة حرارة الغرفة .طيفFTIR يظهر تغيرات في شدة بعض المجموعات الوظيفية المهمة، مثل C=O (الأميد I والألدهيد) N–H (الأميد II)، و C–H الألكان، مما يدل على تحلل البروتين وأكسدة الدهون .أظهرت نتائج تحليل PCA فصلًا واضحًا بين أوقات التخزين مع مساهمة المكونات الرئيسية (PC1 و PC2) بنسبة 63.1% و 26.2%، مما أدى إلى الحصول على قيمة تراكميه بنسبة 89.3 %. تُظهر هذه الدراسة أن الجمع بين FTIR وPCA فعال في تحليل التغيرات الكيميائية خلال عملية تحلل الأسماك العذبة.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor perikanan merupakan salah satu pilar ketahanan pangan di dunia, dibuktikan dengan jumlah produksi ikan di negara berkembang menurut laporan *Food and Agriculture Organization* (FAO) pada tahun 2024 meningkat 10 persen dari tahun 2023 hingga mencapai 205 juta ton. Di Indonesia Ikan air tawar merupakan salah satu komoditas perikanan yang sangat populer dan banyak digemari masyarakat karena kemudahan dalam budidaya dan harganya yang terjangkau, oleh karena itu banyak kalangan yang memilih untuk membudidayakan ikan tersebut (Syafei, 2017). Kualitas ikan air tawar di Indonesia telah menghadapi berbagai tantangan, terutama mengenai kondisi lingkungan dan pembudidayaan yang kurang optimal. Hal ini menyebabkan penurunan akan kualitas ikan tersebut. Kurang terjaganya kualitas akan ikan bisa menyebabkan kerugian, baik itu bagi konsumen maupun produsen.

Salah satu faktor utama yang sering menjadi sebab kerugian dalam perindustrian disebabkan oleh kebusukan pada ikan akibat proses distribusi dan penyimpanan yang kurang memadai. Kebusukan pada ikan bukanlah suatu hal yang bisa diremehkan karena kebusukan bukan hanya mengurangi nilai gizi dan citra rasa, akan tetapi juga dapat menyebabkan keracunan jika ikan tersebut sampai dikonsumsi (Khoir et al., 2023)

Sebagaimana disebutkan dalam QS. an-Nahl (16) : 173

وَهُوَ الَّذِيْ سَخَّرَ الْبَحْرَ لِتَأْكُلُوْا مِنْهُ لَحْمًا طَرِيًّا وَّتَسْتَخْرِجُوْا مِنْهُ حِلْيَةً تَلْبَسُوْنَهَاۚ وَتَرَى الْفُلْكَ مَوَاخِرَ فِيْهِ وَلِتَبْتَغُوْا مِنْ فَضْلِهٖ وَلَعَلَّكُمْ تَشْكُرُوْنَ ﴿١٤﴾

"Dialah yang menundukkan lautan (untukmu) agar kamu dapat memakan daging yang segar (ikan) darinya dan (dari lautan itu) kamu mengeluarkan perhiasan yang kamu pakai. Kamu (juga) melihat perahu berlayar padanya, dan agar kamu mencari sebagian karunia-Nya, dan agar kamu bersyukur." (Q.S an-Nahl(16) :15).

Kata لِتَأْكُلُوْا مِنْهُ لَحْمًا طَرِيًّا memiliki arti "memakan daging yang segar (ikan)"

hal ini menunjukkan bahwa Allah SWT. memerintahkan untuk mengkonsumsi makanan yang bukan hanya halal akan tetapi juga baik dan segar (Ghianovan, 2023). Analisis deteksi terhadap tanda-tanda kebusukan pada ikan masih sangat krusial. Pengamatan dilakukan dengan metode konvensional yang sekilas hanya melihat penampilan, bau serta tekstur dari ikan. Akan tetapi metode ini bersifat subjektif serta sulit diterapkan secara konsisten pada skala industri, karena setiap pengamat akan memiliki standar pengujian masing-masing yang menyebabkan hasil yang kurang akurat. Penlitian tentang analisis terhadap tanda kebusukan ikan telah dilakukan oleh(Leiwakabessy et al., 2014) dengan sampel ikan kakap dan nila, pengamatan dilakukan selama 10 jam dengan waktu pengambilan data setiap 2 jam, adapun parameter yang digunakan ialah kadar nilai TVB, TMA dan TPC yang dihasilakan oleh ikan selama waktu pembusukan 10 jam, kekurangan dari metode ini adalah keterbatasan dalam waktu analisa karena memerlukan waktu inkubasi yang lama dan parameter TMA lebih relevan digunakan untuk ikan air laut.

Aji Lintang dkk (2016) juga melakukan sebuah penelitian tentang monitoring tingkat kebusukan ikan air tawar berbasis *Electronic Nose* (e nose). Pada penelitian ini klasifikasi data menggunakan metode PCA (*principal component analysis*).

Sampel yang digunakan pada penelitian ini ialah ikan lele bawal dan nila, penelitian ini menggunakan pola aroma yang dihasilkan oleh ikan dan akan dideteksi oleh berbagai sensor selama 24 jam. Pada penelitian ini pengolahan data menggunakan metode PCA (*principal component analysis*) yang dapat mengklasifikasi hasil pengujian sensor sesuai dengan kemiripan data dengan presentase variasi dua komponen utama sebesar 98,92%. Kekurangan dari metode ini adalah sensor dirancang hanya untuk mendeteksi isenyawa trimetilamina, yaitu senyawa hasil degradasi protein sehingga kepekaan terhadap berbagai bau yang dihasilkan masih minim (Lintang et al., 2016).

Seiring dengan perkembangan teknologi dan sebagai upaya dalam pemanfaatannya, dibutuhkan sebuah metode yang lebih objektif, akurat dan efisien dalam menganalisis dan memonitoring akan kebusukan ikan. Spektroskopi FTIR muncul sebagai salah satu metode analisis yang dapat memberikan hasil yang cepat dan akurat.untuk mengatasi keterbatasan metode konvensial, Instrumen ini dapat menganalisa perubahan gugus kimia dan struktur molekuler pada sampel dengan menggunakan radiasi inframerah. Dengan menganalisis spektrum FTIR dari sampel daging ikan air tawar pada berbagai tingkat kesegaran, selanjutnya dapat digunakan untuk mengidentifikasi pola spektral yang khas untuk daging segar dan busuk. Baik itu perubahan pada kadar protein, kadar lemak yang teroksidasi maupun pembentukan senyawa volatil pada ikan air tawar (Kobayashi et al., 2019).

Saraiva dkk (2017) melakukan sebuah penelitian tentang penggunaan Spektroskopi FTIR dalam memonitoring pembusukan salmon segar yang disimpan pada suhu 3, 8 dan 30°C dalam tiga jenis kemasan, yaitu kemasan udara (AP), atmosfer termodifikasi (MAP) dan atmoster termodifikasi dengan air lemon

(MAPL). Data spektral yag diperoleh diproses menggunakan analisis komponen PCA dan LDA untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasi tingkat kesegaran berdasarkan spektrum FTIR yang diukur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa salmon dengan jenis kemasan atmoster termodifikasi dengan tambahan air lemon (MAPL) dapat mengurangi jumlah bakteri pada salmon secara signifikan, karena air lemon mampu memberikan penundaan lebih lama dalam pertumbuhan bakteri penyebab. Kekurangan metode ini adalah tidak dilakukannya pengeringan sampel, jadi sampel dalam keadaan yang tidak homogen sehingga menjadikan hasil yang didapatkan tidak konsisten(Saraiva et al., 2017).

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang mengidentifikasi kebusukan ikan melalui parameter kimia (Leiwakabessy et al., 2014) dan pendekatan *electronic nose* (Lintang et al., 2016), penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perubahan mutu ikan lele (*Clarias sp.*) secara lebih akurat dan objektif. Fokus penelitian ini adalah menguji sampel ikan lele dengan variasi waktu penyimpanan (0, 6, 12, 18, dan 24 jam) pada suhu ruang menggunakan spektroskopi FTIR dan metode PCA (*Principal Component Analysis*). FTIR digunakan untuk mendeteksi perubahan gugus fungsi seperti degradasi protein dan oksidasi lipid (pembentukan gugus karbonil), sementara PCA diterapkan untuk mengklasifikasi pola spektral berdasarkan tingkat kebusukan. Selain digunakan untuk mengidentifikasi pola spektral pada ikan, data hasil analisis gugus fungsi dapat memberikan solusi berkelanjutan terhadap masalah pengolahan dan pemanfaatan limbah ikan busuk. Seringkali limbah ikan dianggap sebagai masalah lingkungan jika dibuang disembarang tempat, karena beberapa senyawa kimia yang dikandung dapat menurunkan kualitas tanah dan menyebabkan pencemaran bahkan menimbulkan

bau tidak sedap jika tidak dikelola dengan baik. Dengan mengetahui dan memahami perubahan kimia pada proses pembusukan ikan melalui data FTIR, limbah ikan dapat diolah menjadi produk yang bernilai tambah misalnya dengan dilakukan proses pengomposan dan fermentasi sehingga dapat menghasilkann produk seperti biogas, pupuk organik dll. (Yuvaraj et al., 2019).

Pola spektral ini kemudian dapat digunakan sebagai dasar untuk membangun model untuk mengamati perubahan mutu ikan berdasarkan gugus kimia pada proses pembusukan ikan air tawar secara objektif dan akurat. Metode identifikasi data yang akan digunakan adalah *principal component analysis* (PCA), yang mana metode ini memiliki prinsip kerja mengurangi dimensi dari dataset yang kompleks, dan tetap mempertahankan sebagian besar informasi yang ada sehingga bisa memvisualisasikan data dengan lebih mudah berdasarkan hasil klasifikasi (Tazi, 2023).

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis gugus fungsi pada proses kebusukan daging ikan lele menggunakan spektroskopi FTIR dan metode PCA. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan hasil cepat, akurat, dan objektif dalam mengidentifikasi perubahan molekuler selama pembusukan, sekaligus menjadi dasar pengembangan sistem monitoring kesegaran ikan berbasis teknologi. Hasil penelitian diharapkan mampu menghasilkan model deteksi kebusukan yang cepat, konsisten, dan sesuai dengan prinsip makanan *tayyib* (baik dan aman dikonsumsi) dalam perspektif Islam dan dapat menjadi solusi ilmiah untuk industri perikanan dalam menjaga kualitas produk dalam mengurangi kerugian ekonomi akibat kebusukan serta menjadi dasar dalam pengolahan serta pemanfaatan limbah ikan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana analisis perubahan gugus fungsi yang terjadi pada ikan air tawar selama proses pembusukan berbasis spektroskopi FTIR ?
2. Bagaimana kemampuan spektroskopi FTIR dan PCA dalam mengidentifikasi kebusukan ikan air tawar di berbagai jam ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1 Untuk mengetahui analisis perubahan gugus fungsi yang terjadi pada ikan air tawar selama proses pembusukan berbasis spektroskopi FTIR

2 Untuk mengetahui kemampuan spektroskopi FTIR dan PCA dalam mengidentifikasi kebusukan ikan air tawar di berbagai jam

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Dapat memberikan informasi perubahan mutu berdasarkan struktur kimia pada ikan air tawar selama proses pembusukan sehingga mempermudah dalam pengolahan dan pemanfaatan limbah ikan
2. Dapat memberikan kontribusi dan menjadi dasar pengembangan teknologi baru untuk pengawasan kualitas produk pangan lainnya.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini sesuai dengan tujuan dan menghindari munculnya masalah baru, maka diperlukan adanya batasan masalah yaitu sebagai berikut :

1. Ikan yang digunakan sebagai sampel yaitu ikan lele lokal.

2. Sampel hanya terdiri dari bagian daging ikan lele.
3. *Fourier Transform Infrared (FTIR)* hanya digunakan untuk menganalisa senyawa yang menunjukkan gugus fungsi melalui bilangan gelombang yang dihasilkan.
4. Olah data metode PCA menggunakan aplikasi OriginPro.

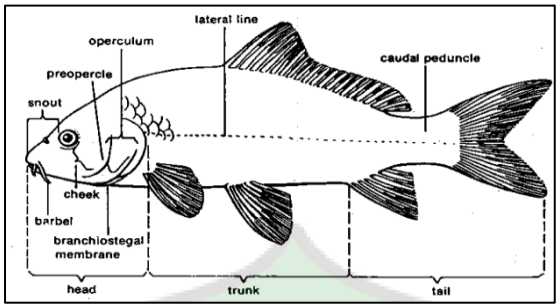
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Ikan Air Tawar

Ikan merupakan salah satu hewan yang memiliki banyak karakteristik, salah satunya adalah hewan yang bernafas dengan insang dan hewan aquatik. Beberapa ikan juga bernafas melalui alat tambahan seperti gelembung renang dan gelembung udara. Tipe ginjal yang dimiliki ikan adalah profonefros dan mesonefros. Jantung ikan berkembang dengan baik, yang mana sirkulasinya menyangkut seluruh aliran darah dari jantung melalui insang ke seluruh bagian tubuh. Secara umum morfologi ikan dapat dilihat pada gambar berikut (Kottelat, 1996)



Gambar 2. 1 Bagian Tubuh Ikan Secara Morfologi

a. Mulut Ikan

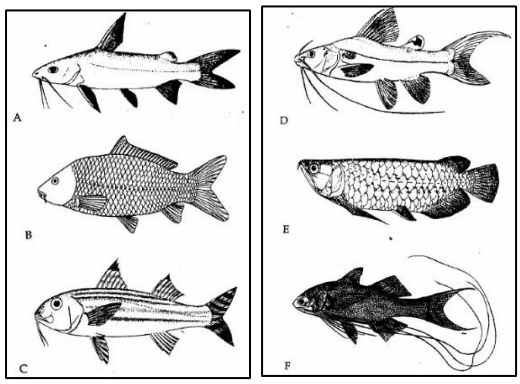
Mulut merupakan organ yang berhubungan langsung dengan makanan yang dikonsumsi oleh ikan. Didalam mulut ikan terdapat beberapa organ, misalnya lidah yang melekat pada dasar mulut, kelenjar lendir dan rahang serta gigi-gigi kecil yang berbentuk kerucut. Ikan memiliki bentuk mulut yang berbeda-beda sesuai dengan habitat dari induvidu suatu ikan. Ikan dengan bentuk mulut yang subterminal

biasanya berada dibagian dasar perairan, sedangkan ikan pelagik biasanya memiliki bentuk mulut yang terminal (Harpida, 2019) .

Gambar 2. 2 Letak mulut ikan sesuai habitat (Terminal dan Subterminal)

b. Sungut Ikan

Mulut ikan seringkali dilengkapi dengan sungut, meskipun tidak pada semua jenis ikan. Sungut pada ikan berfungsi sebagai alat peraba ketika ikan mencari makan, yang mana sungut ikan terletak di ujung depan rahang, sudut bibir atau di rahang bawah dan rahang atas. Bentuk dan jumlah sungut pada ikan bervariasi, ada yang pendek dan tebal atau panjang dan tipis dengan jumlah satu pasang sampai empat pasang(Sjafei, 2011) Adapun bentuk sungut ikan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Variasi sungut ikan
(a) manyung. *Arius venosus;* (b) ikan mas, *Cyprinus carpi;* (c) biji nangka, *Upeneus vitlatus*; (d) tagih, *Hemigabrum nemurus*; (e) siluk, *Scleropages formosus;* (f) janggut, *Polynemus dubius.*

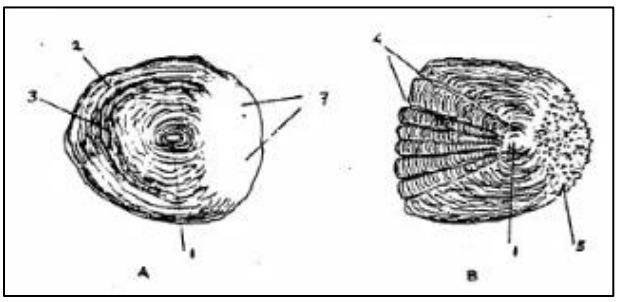
c. Bentuk Tubuh

Ikan memiliki bentuk tubuh yang sangat bervariasi dengan pola dasar ynag sama yaitu kepala, badan dan ekor. Pada umumnya ikan memiliki bentuk tubuh yang

simetris bilateral, bentuk tubuh ini berkaitan dengan temoat hidup maupun gerakan dari ikan sebagai upaya diri dalam penyesuaian lingkungan, terutama pada lingkungan fisik perairan (Sjafei, 2011)

d. Sisik Ikan

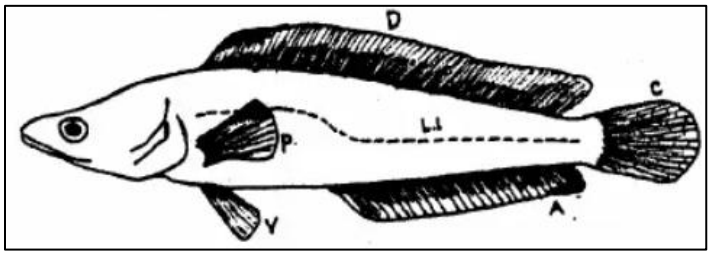
Sebagian besar ikan, tubuhnya ditutupi oleh sisik yang menjadi semacam kerangka luar. Sisik ikan berasal dari lapisan kulit yang dinamakan dermis, beberapa sisik ikan bertekstur keras karena tersusun dari $CaCo_3$ dan khitin (derivat dan protein) yang biasanya ditemukan pada ikan primitif, dan sisik ikan yang cenderung lentur ditemukan pada ikan dengan tingkat evolusi yang lebih modern. Berdasarkan bentuk dan bahan yang terkandung didalamnya, sisik ikan dapat dibedakan menjadi lima jenis, yaitu plakoid, kosmoid, ganoid, sikloid dan stenoid.



Gambar 2. 4 (A)sikloid (B)stenoid

e. Sirip Ikan

Sirip ikan merupakan organ yang digunakan untuk menjaga keseimbangan tubuh, selain itu sirip ikan juga berfungsi sebagai alat peraba, penyalur sperma dan lain-lain. Sirip ikan terdiri atas lima macam, yakni sirip dorsal, kaudal, anal, ventral dan pektoral. Tiga sirip pertama juga dikenal sebagai sirip tunggal, dan dua jenis sirip lainnya digolongkan dalam sirip ganda karena jumlahnya yang sepasang. Gambar menunjukkan contoh ikan gabus (*Channa striata*) yang mempunyai lima jenis sirip atau dikatakan mempunyai sirip lengkap.



Gambar 2. 5 Lima jenis sirip pada ikan gabus
(A) Sirip anal; (C) sirip kaudal; (D) sirip dorsal; (P) sirip pektoral; (V)sirip ventral

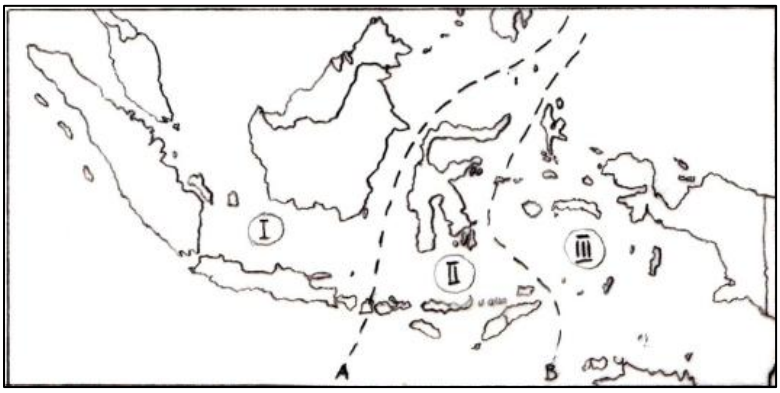
Sirip pada ikan membentuk sebuah eksoskleton, yang mana terdiri atas tengkorak, tulang belakang, tulang rusuk, gelang pektoral dan banyak tulang kecil lainnya yang berguna untuk menopang jajari dari sirip ikan. Sirip ikan terbagi menjadi sirip punggung dan sirip ekor, sirip pada ikan air tawar terdiri dari rangka atas jaringan tulang atau tulang rawan yang disebut jari-jari sirip. Jari-jari sirip ikan ada yang bercabang dan tidak tergantung pada jenis ikannya.

Ikan memegang peranan penting dalam pemenuhan sumber gizi dan keberlangsungan hidup bagi manusia pada berbagai negara berkembang. Ikan juga berfungsi sebagai sumber dari asam lemak tidak jenuh jamak (PUFA), protein, mineral dan vitamin. Ikan air tawar merupakan salah satu komoditas yang strategis untuk memenuhi kebutuhan protein yang relatif murah dan banyak digemari konsumen Indonesia. Kandungan gizi pada setiap ikan akan berbeda tergantung pada faktor internal dan kesternal. Adapun faktor internal meliputi jenis atau spesies ikan, jenis kelamin, umur dan fase reproduksi pada ikan, sedangkan faktor eksternal meliputi faktor yang ada pada lingkungan hidup ikan berupa habitat, ketersediaan pakan dan kualitas perairan tempat ikan hidup yang mana akan berpengaruh terhadap kandungan kimia didalam daging ikan seperti kandungan proksimat, asam amino dan asam lemak (Hafiludin, 2015)

Tabel 2. 1 Beberapa spesies ikan endemik di Indonesia

No	Nama ilmiah	Nama inggris	Nama lokal	Lokasi
1	*Adrianichthys oophorus*	Eggcarrying buntingi	Rono	Danau Poso
2	*Chilatherina sentaniensis*	Sentani rainbowfish		Danau Sentani
3	*Anguilla celebensis*	Celebes longfin eel	sogili	Danau Poso
4	*Melanotaenia ajamaruensis*	Ajamaru lakes rainbowfish		Danau Ayamaru
5	*Melanotaenia arfakensis*	Arfak rainbowfish		Arfak
6	*Melanotaenia japenensis*	Yapen rainbowfish		Yapen
7	*Mugilogobius sarasinorum*	Sarasin's goby	Bungu	Danau
8	*Oryzias matanensis*	Matano medaka		Danau Matano
9	*Telmatherina celebensis*	Celebes rainbow	Opudi	Danau

Ikan merupakan sekelompok verterbrata yang memiliki populasi sekitar 5000 spesies asli ikan laut, air payau dan air tawar yang mencakup hampir 15% dari 33.100 spesies ikan yang diketahui di dunia, dan Indonesia merupakan salah satu negara dengan spesies paling kaya di Asia Tenggara dengan 1.218 spesies yang termasuk dalam 84 famili dan 630 spesifik endemik (Hubert 2015). Ikan endemik merupakan ikan yang keberadaanya hanya pada satu tempat tertentu dan tidak ada ditemat lain. Beberapa sepesies ikan endemik diperlihatkan pada tabel 1. Tingginya keanekaragaman dan endemisme ikan air tawar di Indonesia sebagian besar berasal dari fakta bahwa ikan air tawar berada pada kondisi bentang alam terestrial yang terfragmentasi oleh banyak lengkungan vulkanik yang membatasi penyebaran antar daerah dari aliran sungai. Sebagai konsekuensinya, sebagian besar ikan air tawar hanya mampu menempati sebagian kecil wilayah dimana mereka mampu untuk berkembang biak karena fragmentasi danau dan sungai (Aditya Hutama et al., 2016)



Gambar 2. 6 Garis batas iktiogeografi di kepulauan Indonesia

Ikan air tawar merupakan ikan yang hidup di perairan yang memiliki tekanan osmotik lebih besar (hiperosmotik) daripada tekanan osmotik lingkungannya. Tekanan osmotik yang dimiliki oleh ikan air tawar berkisar 256-325 mOsm/kg (-0.5 sampai -0.61 C). Inventarisasi ikan air tawar di Indonesia telah berlangsng sejak abad ke – 18 dan sampai sekarang masih banyak spesies baru yang ditemukan dan dideskripsikan disetiap tahunnya, akan tetapi terdapat beberapa keterbatasan sejak awal perkembanganya, diantara lain disebabkan oleh kepulauan Indonesia yang memiliki hampir 17.000 pulau dan sebagian besar pulau tersebut merupakan pulau terpencil dengan akses yang terbatas. Ditinjau dari sudut iktiogeografis, ikan air tawar di Indonesia mendiami tiga daerah sebaran geografis, yaitu paparan Sunda, daerah Wallace dan paparan Sahul yang dibatasi oleh dua garis maya (garis Wallace dan garis Weber) dan masing masing daerah sebaran tersebut dihuni oleh berbagai spesies yang berbeda (Syafei, 2017).

2.1.2 Komposisi Proksimat dan Gugus Fungsi pada Daging Ikan

Gugus fungsi merupakan sekelompok atom dalam suatu molekul yang memiliki sifat fisika dan kimia yang khas. Gugus fungsi dapat menunjukkan karakteristik senyawa berdasarkan reaktivitas dan sifat-sifat dari suatu molekul. Gugus fungsi pada ikan salah satunya digunakan sebagai penanda alami yang berguna untuk

mengidentifikasi unsur kimiawi yang terkandung dalam ikan. Terdapat beberapa faktor yang mampu mempengaruhi unsur yang terkandung dalam gugus fungsi ikan, salah satunya ialah kondisi lingkungan yang berbeda pada setiap ikan sehingga gugus fungsi yang terkandung pada ikan air tawar dengan ikan air laut akan berbeda, gugus fungsi pada ikan juga dipengaruhi oleh makanan yang dikonsumsi yang dapat menentukan kandungan otolit pada ikan. karakterisasi gugus fungsi pada ikan dapat memberikan berbagai manfaat, disamping dapat digunakan untuk menentukan kelompok ikan berdasarkan lingkungan yang dihuni, analisis gugus fungsi juga dapat dimanfaatkan untuk klasifikasi tingkat kebusukan dari daging ikan yang bertujuan untuk memonitoring kesegaran ikan tersebut (Kerr & Campana, 2013)

Gugus fungsi kimia pada setiap ikan akan berbeda-beda tergantung pada berbagai faktor, misalnya pada jenis ikan, antar individu dalam spesies dan antar bagian tubuh dari satu individu ikan. Komposisi proksimat daging ikan umumnya terdiri dari kadar air 70-85 %, protein 15-25 %, lemak 1-10%, karbohidrat 0.1-1 % dan mineral 1-1.5% (Okada,1990). Komposisi proksimat ikan berbeda pada habitat yang berbeda, hal ini dikemukakan oleh (Fallah et al., 2013). bahwa komposisi proksimat ikan berbeda pada habitat air tawar dan ikan air payau. Selain itu perbedaan komposisi proksimat juga dipemgaruhi oleh faktor lain, misalnya ukuran, jenis kelamin dan kondisi seksualitas ikan. Berikut merupakan komposisi proksimat dari ikan air tawar dan ikan air payau.

Tabel 2. 2 komposisi proksimat ikan air tawar dan air payau

Komposisi Proksimat	Air Tawar	Air Payau
Air (%)	75.857	70.787
Abu (%)	2.812	1.405
Protein (%)	20.496	24.175
Lemak (%)	0.721	0.853
Karbohidrat (%)	0.114	2.780

Air merupakan komponen utama dalam jaringan ikan dan berperan penting dalam menjaga fungsi biologis organisme. Dalam cairan tubuh, air berfungsi sebagai media pengangkut nutrisi dan metabolit, serta mempertahankan struktur molekul biologis seperti protein dalam kondisi fungsionalnya (Lorenzo et al., 2019). Kandungan air dalam daging ikan umumnya berkisar antara 70–75%, tergantung pada spesiesnya. Jaringan ikan terdapat dalam dua bentuk, yaitu air yang terikat pada protein dan air bebas, keduanya memiliki fungsi biologis penting Pengurangan kadar air, baik secara alami maupun melalui proses olahan, dapat mempengaruhi kualitas produk ikan, terutama dari segi tekstur dan kesegaran. (Ram et al., 2017).

Lipid merupakan kelompok senyawa organik yang luas dan heterogen, meliputi zat biologis yang dapat diekstraksi dengan pelarut nonpolar seperti heksana, eter, kloroform, atau etanol. Kelompok ini mencakup berbagai senyawa seperti asam lemak, gliserida, fosfogliserida, steroid, sphingolipid, serta kombinasi lipid dengan karbohidrat dan protein (Puri, 2018). Dalam jaringan ikan, lipid terutama tersusun atas fosfogliserida dan triasilgliserol yang berperan sebagai sumber energi dan komponen membran sel (Xu et al., 2016). Kandungan lipid dalam ikan sangat

bervariasi, biasanya berkisar antara 0,5% hingga 18%, tergantung pada spesies, musim, dan fase reproduksi (Williams, 2018). Lipid dalam ikan berfungsi sebagai cadangan energi yang dapat digunakan saat dibutuhkan (Girousse et al., 2018). Selain itu, fosfolipid yang berasosiasi dengan protein globular membentuk struktur penting dalam membran plasma, berperan dalam menjaga permeabilitas dan fungsi transportasi antar sel (Lordan et al., 2017).

Protein dalam jaringan ikan diklasifikasikan berdasarkan kelarutannya dalam larutan garam menjadi tiga kelompok utama. Protein sarkoplasma adalah protein yang larut dalam larutan garam dengan konsentrasi ionik rendah (<0,15 M), mencakup enzim-enzim metabolisme otot seperti globulin miogen, dan membentuk sekitar 25–30% dari total protein otot (Yu et al., 2017). Protein miofibrilar, yang larut pada kekuatan ionik tinggi (>0,5 M), terdiri atas troponin, aktin, aktomiosin, miosin, dan tropomiosin, berperan penting dalam fisiologi otot dan membentuk sekitar 65% dari total protein (Ahmed, 2017). Protein miofibrilar juga menentukan sifat pembentukan gel daging ikan, selain itu, protein stroma, yang larut dalam larutan asam atau basa tetapi tidak dalam larutan garam netral, membentuk sekitar 3% dari total protein pada teleostei dan berperan dalam membentuk jaringan ikat otot (Chanarat, 2015). Kandungan protein stroma yang rendah dalam ikan berkontribusi pada tekstur otot yang lembut (Muthukumar et al., 2018). Secara umum, komposisi biokimia protein dalam ikan menunjukkan keseimbangan nutrisi yang baik, menjadikan ikan sebagai sumber makanan berkualitas tinggi.

Gugus fungsi ikan yang terdeteksi berasal dari struktur penyusun daging ikan tawar yang diidentifikasi menggunakan *Spektroskopi FTIR* (Frida, 2022).

Penelitian yang dilakukan Eko Nur dkk (2019) pada penelitiannya yang berjudul karakteristik mutu ikan air tawar dengan berbagai pengolahan menunjukkan bahwa ikan air tawar mengandung komponen unsur alkena (-C=C-), hidrokarbon (C-H), asam lemak *trans,* N-H *stretching,* C=O, C-N, N-H dan protein (Dewi et al., 2019). Gugus alkena menunjukkan adanya asam lemak tidak jenuh dan asam lemak bebas tak jenuh yang ditunjukkan pada bilanngan gelombang 933.35 cm^{-1}, 1442.75 cm^{-1} dan 1658.78 cm^{-1}, gugus fungsi hidrokarbon dan asam lemak *trans* terdeteksi pada bilangan gelombang 2924.09 cm^{-1} dan 966 cm^{-1}, gugus fungsi N-H *stretching* terdeteksi pada seluruh sampel yang ditunjukkan pada bilangan gelombang 3425.58 cm^{-1} serta C=O, C-N, N-H dan protein terdeteksi pada bilangan gelombang 1595 cm^{-1} dan 1658.78 cm^{-1} (Dewi et al., 2019).

2.1.3 Proses Pembusukan dan Kemunduran Mutu ikan

Ikan merupakan salah satu makanan laut yang sangat mudah mengalami kerusakan atau kemunduran mutu (*highly perishable food*). Sifat biologis dan kimiawi yang dimiliki ikan menjadikan ikan mengalami kerusakan setelah proses penangkapan dan akan menjadi lebih cepat jika terdapat aktivitas metabolisme dari berbagai mikroorganisme Secara umum ikan akan mengalami transformasi mutu sesudah mati. Transformasi yang dialami berupa perubahan secara fisika, kimiawi maupun biologis. Pembusukan ikan dipengaruhi oleh beberapa faktor, baik itu faktor lingkungan, peralatan dan air yang digunakan dan juga metode panen serta jenis pengolahan pada ikan, dimana pembusukan ini dapat mempengaruhi nilai kandungan gizi (Austin, 2006).

Hasil perikanan air tawar merupakan jenis pangan yang kaya akan protein dan noprotein nitrogen serta kandungan lemak. Populasi mikroorganisme pada produk

pangan tersebut sangat bervariasi dan beragam yang dapat menjadi penyebab kerusakan dan pembusukan pada ikan. Mikroorganisme biasanya hidup pada sisik, insang dan intestinal pada ikan, dimana jumlah bakteri yang terkandung pada ikan bisa mencapai 10^3 sampai 10^8 sel/gram (Sopandi, 2014). Terdapat banyak sekali jenis bakteri yang dapat menyebabkan pembusukan ikan, salah satunya ialah bakteri *Pseudomonas, Flavobacterium* dan *Acromobacter* yang merupakan golongan bakteri yang mampu menghasilkan asam dan aldehida, bakteri ini memegang peranan besar dalam proses pembusukan pada ikan(Sahubawa, 2018).

Selama proses penyimpanan, ikan air tawar akan mengalami kerusakan yang diakibatkan oleh aktivitas mikroba, yang terdiri dari mikroba pembusuk dan mikroba pathogen. Berikut merupakan penjelasan mengenai mikroba pembusuk dan mikroba panthogen.

a. Mikroba Pembusuk

Mikroba pembusuk akan mengeluarkan enzim dan terjadi proses degradasi protein menjadi senyawa-senyawa yang kebih sederhana seperti *trimethylamine* dan amonia, alkohol, keton dan asam butirat. Senyawa *trimethylamine* merupakan senyawa organik yang tersisim dari atom nitrogen, karbon dan hidrogen. Ciri khas dari peningkatan aktivitas mikroba pembusuk adalah munculnya bauk busuk, tekstur ikan menjadi lunak berair dan pH yang meningkat (Lintang et al., 2016).

b. Mikroba Panthogen

Meningkatnya konsentrasu metabolit sekunder pada ikan disebabkan oleh kerusakan biologis yang ditimbulkan oleh aktivitas mikroba panthogen. Hal ini dapat menyebabkan tumbuhnya penyakit, baik berupa keracunan maupun gangguan kesehatan lainnya pada ikan. Terdapat beberapa jenis mikroba

panthogen yang sudah ditetapkan dalam menentukan keamanan pangan, seperti *Eschericia coli, salmonella, Shigella, Vibrio parahaemolyticus, V. cholera, Clostridium botolinum, C. perfringens, Staphylocuccus aureus* dan *Listeria monocytogenes.*

Pada umunya pembusukan ikan akan mengalami tiga fase perubahan, yaitu fase prerigor, rigormortis dan postrigor, dimana indikator perubahan kualitas ikan tersebut dapat dilihat dari fase perubahan-perubahan biokimia seperti ischemia, penurunan jumlah ATP, peningkatan konsentrasi ion Ca^{2+}, penurunan pH dan aktivasi lisosom (Masengi et al., 2021a). Berikut merupakan penjelasan tentang tiga fase perubahan yang dialami oleh ikan saat proses pembusukan :

1. Prerigor

Prerigor merupakan fase pertama perubahan yang terjadi setelah kematian ikan. Fase ini ditandai dengan keluarnya lendir encer, bening atau transparan yang menutupi seluruh tubuh ikan hampirr 1-2.5% dari berat tubuhnya. Proses ini disebut hiperemia dan berlangsung selama 2-4 jam. Lendir yang dikeluarkan sebagian besar berupa glikoprotein dan musin, yang merupakan media yang menguntungkan bagi pertumbuhan bakteri (Junianto, 2003). Tahap pertama terjadi pada saat daging ikan masih lunak. Siklus pertama yang terjadi saat ikan mati adalah peredaran darah terhenti sehingga pasokan oksigen untuk aktivitas metabolisme terhenti. Pada makanan ikan, proses degradasi dimulai pada kondisi anaerobik. Selama waktu ini, ATP dan kreatin fosfat direduksi melalui proses aktif glikolisis. Proses glikolisis mengubah glikogen menjadi asam laktat, yang menurunkan pH (Eskin, 1990).

2. Rigor Mortis

Rigor bermakna kaku, dan mortis bermakna mati. Pada fase ini ikan mengalami gejala berupa kejang yang terjadi setelah ikan mati, akan tetapi kondisi ikan masih tergolong sangat segar. Lamanya fase rigormortis dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu kandungan glikogen, jenis ikan, suhu, penanganan sebelum proses panen, kondisi stress ikan sebelum kematian, kondisi biologis ikan dan suhu penyimpanannya. Lama fase rigor stergantung dari spesies ikan, temperatur dan kondisi ikan (Skjervold et al., 2001).

Fase rigor mortis dapat tertunda dengan tingginya kandungan glikogen pada daging ikan. Penurunan ATP berkolerasi lurus dengan laju fase rigor mortis, ATP akan terus terdegradasi dan fase rigor mortis dan menjadi sempurna saat konsentrasi ATP tepat pada 1 μmol/g. Pada tahap ini otot ikan tidak mau berkontraksi dan tidak mampu mempertahankan kekenyalannya sehingga otot ikan menjadi kejang. Proses pengejangan pada ikan biasanya dimulai pada bagian ekor, karena ekor merupakan bagian yang paling aktif bergerak sehingga saat ikan mati sel dibagian ini yang memiliki kandungan ATP pakung rendah dibanding dengan bagian yang lain, kemudian proses pengejangan akan menyebar ke arah kepala(Silvana et al., 2018).

Senyawa *adenosin trifosfat* merupakan sumber energi yang digunakan ikan saat ikan masih hidup, ketika ikan mati senyawa ini menjadi anaerob dan terurai oleh enzim yang dihasilkan oleh tubuh ikan dan bersamaan terjadi proses biokimia yang menyebabkan bagian protein otot (*aktin* dan *miosin*) berkontraksi dan juga menjadikantubuh ikan menjadi kaku, itulah penyebab terjadinya rigor mortis pada ikan (Belvi, 2010).

Proses rigor mortis berpengaruh terhadap penanganan dan pengolahan ikan. Otot yang cenderung berinteraksi akan menyebabkan kekejangan jaringan. Jika pemotongan dilakukan pada saat sebelum atau selama tahap rigor, maka otot akan tetap berkontraksi sehingga menghasilkan tekstur bergelombang seperti karet. Pada akhir fase rigor mortis, nilai pH dalam daging ikan akan meningkat secara berangsur-angsur sehingga kondisi semula asam akan berubah menjadi sedikit basah karena terbentuknya senyawa volatile yang bersifat basa seperti amoniak, trimetil amin, indol dan lai-lain (Wheaton et al., 1985).

3. Postrigor

Fase postrigor ini ditandai dengan kembali lunaknya daging ikan secara perlahan-lahan setelah masa kejang, proses melunaknya daging ini merupakan tanda awal dari pembusukan yang meliputi otolisis dan pembusukan oleh mikroorganisme. Proses otolisis merupakan proses penguraian daging ikan oleh enzim-enzim yang terdapat pada tubuh ikan tanpa adanya pengontrolan dari otak sehingga bisa merusak organ tubuh yang lain. Pada proses otolitis ini akan terjadi peningkatan jumlah bakteri karena hasil penguraian enzim pada proses otolitis merupakan media hidup yang cocok untuk pertumbuhan bakteri dan mikroorganisme lain (Silvana et al., 2018).

Aktivitas enzimatis pada fase ini dat membongkar komponen daging menjadi lebih sederhana, perubahan komponen tersebut ialah perubahan terhadap karbohidrat, protein dan lemak, dimana protein akan mengalami pembongkaran enzim-enzim otolitik menjadi peptidak dan asam amino, kemudian akan terurai lagi menjadi metabolit sederhana yang pada umunya dapat menyebabkan ikan mengeluarkan bau busuk. Perubahan lemak yang terjadi disebabkan oleh enzim

lipotik yang mengurai asam lemak menjadi senyawa aldehida dan keton sehingga menyebabkan ikan mengalami ketengikan(Lasmi, 2016)

Pada tahap postrigor ini ikan mulai mengeluarkan warna, bau dan tekstur yang dapat digunakan untuk menunjukkan indikator tingkat kebsusukan pada daging ikan. Proses perubahan ini akan berlangsung sesuai dengan jumlah lemak dan ukuran ikan, tahap ini akan berlangsung cepat jika terjadi pada ikan yang berukuran kecil dan berlemak tinggi serta pada ikan yang lambungnya penuh makanan saat tertangkap. (Masengi et al., 2021).

2.1.4 Spektroskopi FTIR

Spektroskopi merupakan teknik analisis yang digunakan untuk mempelajari interaksi antara radiasi elektromagnetik dan materi atau sebuah bahan yang didasarkan pada penyerapan gelombang inframerah. Spektrum inframerah sendiri memiliki panjang gelombang lebih besar dari panjang gelombang cahaya tampak yang terletak pada daerah yang memiliki panjang gelombang 0.78-1000 μm (Bintang M, 2010).

Spektroskopi inframerah merupakan suatu alat yang sering digunakan untuk mengidentifikasi senyawa alami maupun buatan didalam suatu bahan. Instrumen ini memanfaatkan radiasi inframerah yang dilewatkan pada senyawa organik dan menghasilkan sebuah frekuensi yang sebagian akan diserap dan sisanya akan diteruskan atau ditransmisikan. Gambaran antara frekuensi yang diserap dengan frekuensi yang ditransmisikan akan menghasilkan suatu spektrum inframerah ynag berkaitan dengan perubahan perubahan vibrasi didalam molekul (Kusumastuti, 2011).

Dilihat dari segi aplikasi dan instrumentasi, spektroskopi inframerah dibagi menjadi tiga jenis radiasi, yaitu inframerah dekat, sedang dan jauh. Berikut merupakan tabel daerah spektroskopi inframerah (Hayati, 2007) :

Tabel 2. 3 Daerah Spektroskopi inframerah

Daerah	Panjang Gelombang (μm)	Bilangan Gelombang(cm^{-1})	Frekuensi (Hz)
Dekat	0.78-2.5	12800-4000	$3.8x10^{14}$ - $1.2x\ 10^{14}$
Sedang	2.5-50	4000-200	$1.2x10^{12} – 6x10^{14}$
Jauh	50-100	200-10	$6x10^{14}$ x $3x10^{14}$

Berdasarkan pembagian jenis inframerah pada tabel 2.3, spektroskopi IR dekat dengan panjang gelombang 0.78 – 2.5 μm merupakan IR yang peka terhadap vibrasi overtone, IR sedang yang berkaitan dengan transisi energi vibrasi dengan panjang gelombang 2.5 – 50 μm bertugas memberikan informasi mengenai gugus fungsi dan analisis senyawa dalam molekul dan IR jauh dengan panjang gelombang 50-100 μm bertugas untuk menganalisis molekul yang mengandung atom-atom berat senyawa anorganik. Setiap senyawa memiliki absorpsi yang berbeda yang disebut dengan daerah *fingerprint,* daerah ini menunjukkan absorpsi yang disebabkan oleh vibrasi regangan ataupun bengkokan yang rumit (Sari et al., 2018).

Dalam spektroskopi inframerah, energi dibutuhkan untuk melakukan transisi vibrasi yang perubahan energinya hanya terbatas pada tingkat molekul. Pada tingkat ini keadaan dalam perbedaan vibrasi dan rotasi digunakan untuk mengabsorbsi sinar inframerah. Jadi jika ingin mengabsorbsi sinar inframerah molekul harus memiliki perubahan momen dipol sebagai akibat dari vibrasi dan radiasi medan listrik yang berubah-ubah akan berinteraksi dengan molekul

sehingga menghasilkan amplitudo pada salah satu gerakan molekul. Adapun Instruementasi absorbsi inframerah dibagi menjadi dua jenis yaitu (Frida, 2022) :

1. Instrumentasi dispersif (konvensional)

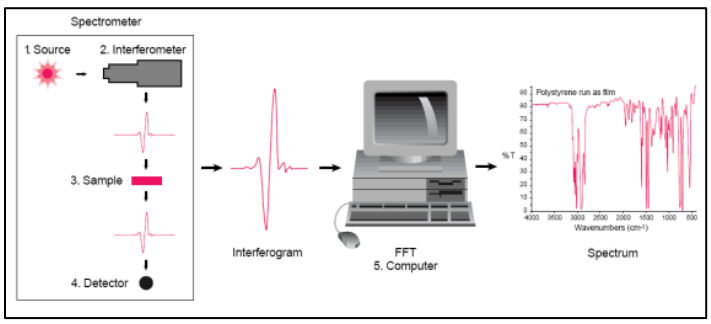
Instrumen yang hanya digunakan untuk analisis kualitatif yang spektrum inframerahnya dibentuk dengan melewatkan sinar inframerah pada sampel. Untuk membaca spektrum yang dihasilkan digunakan sebuah alat dispersi atau monokromator yang berbentuk kisi difraksi atau prisma yang dirotasikan. Kelemahan spektrometer ini terletak pada monokromator yang memiliki celah kecil untuk keluar masuknya sinar sehingga bisa membatasai panjang gelombang radiasi untuk mencapai detektor. Kelemahan lain spektrometer ini bisa menghilangkan sebagian besar energi sinar inframerah dan menghasilkan sinar hamburan dalam jumlah yang banyak(Hayati, 2007).

2. Instrumentasi FTIR

Spektroskopi FTIR (*fourier transform infrared*) merupakan salah satu teknik analitik yang digunakan untuk proses identifikasi struktrur mokelul suatu senyawa organik baik secara kualitatif ataupun secara kuantitatif dan bisa mengukur suatu panjang gelombang secara bersamaan dengan resolusi yang tinggi. Komponen utama spektroskopi FTIR adalah interferometer michelson yang mempunyai fungsi untuk menguraikan radiasi sinar infrared menjadi komponen frekuensi. Keunggulan dari metode spektroskopi FTIR ini adalah informasi struktur molekul dapat diperoleh secara tepat dan akurat serta dapat digunakan untuk mengidentifikasi sampel dalam berbagai fase, seperti gas, cair dan padat (Kusumastuti, 2011)

Spektroskopi FTIR merupakan sebuah metode analisis non-destruktif untuk menganalisis kualitatif sebuah senyawa yang tidak memerlukan preparasi sampel yang berlebihan. Gugus fungsi yang dihasilkan bertanggung jawab atas munculnya puncak serapan IR pada spektrum FTIR pada panjang gelombang tertentu. Spektroskopi FTIR juga bisa digunakan untuk analisis kuantitatif analit, dengan menggunakan hukum Beer, intensitas puncak (absorbansi) spektrum IR berbanding lurus dengan konsentrasi (Voort et al., 2001)

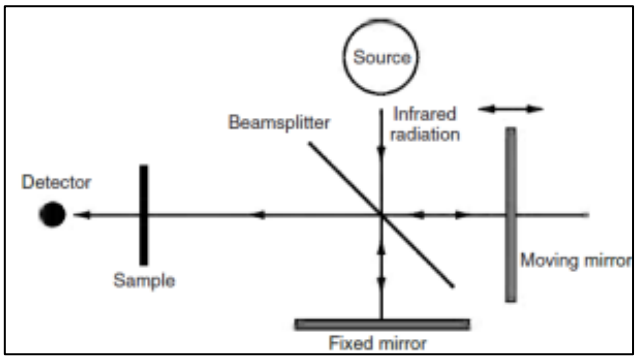
Prinsip kerja dari spektroskopi FTIR adalah dengan mengarahkan sinar infrared yang dipancarkan dari sumber cahaya ke interferometer yang akan menghasilkan kisi difraksi yang membelah menjadi beberapa berkas ke arah yang saling berbeda, dimana nanti akan dilakukan pengkodean spektral. Berkas sinar yang dihasilkan akan memasuki bagian sampel dan akan ditransmisikan atau dipantulkan dari permukaan sampel sehingga akan menghasilkan panjang gelombang yang dapat diperiksa secara individual.



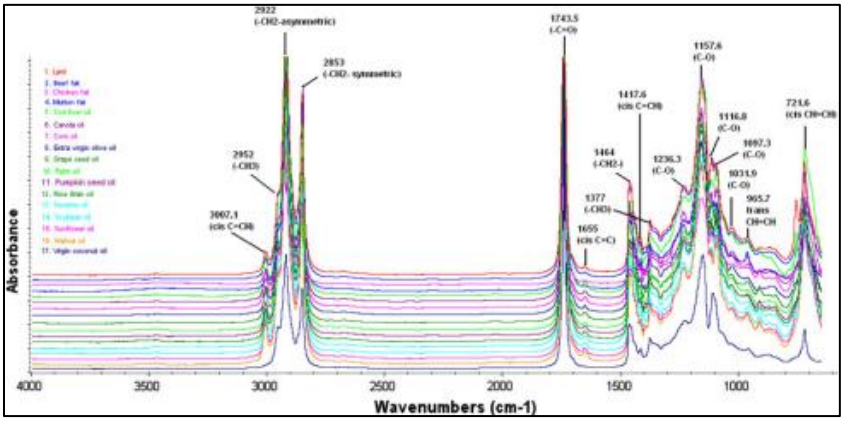
Gambar 2. 7 Prinsip kerja spektroskopi FTIR

Komponen utama dalam spektroskopi FTIR adalah Michelson Interferometer , yang mampu mendeteksi gerakan molekuler dan melibatkan perubahan momen dipol. Interferometer terdiri dari satu beamsplitter dan dua cermin, dengan prinsip kerja yaitu, cahaya polikromatik akan mentransmisikan oleh beamsplitter, kemudian cahaya kan terbagi menjadi dua arah yakni arah cermin 1 dan cermin 2,

kedua berkas sinar akan bergabung di beamsplitter lagi untuk menyinari sampel yang sebelumnya diterima oleh detektor. Cermin bergerak berfungsi sebagai pengubah panjang jalur optik sehingga dihasilkan interferensi cahaya antara dua berkas yang terbelah (Smith, 2011).



Gambar 2. 8 Michelson Interferometer



Gambar 2. 9 Gelombang yang dihasilkan dari pengukuran FTIR (Che Man et al., 2011)

Analisis menggunakan spektroskopi FTIR akan menghasilkan data karakteristik kimiawi dari suatu sampel berupa spektra FTIR yang merupakan hasil interaksi antara senyawa kimia dalam matriks sampel yang kompleks. Spektra FTIR terdiri dari berbagai informasi struktur molekuler dengan serangkaian pita serapan yang spesifik untuk masing-masing molekul sehingga dapat digunakan untuk membedakan suatu sampel yang memiliki kemiripan(Saputri et al., 2023)

Ketika senyawa organik dikenai radiasi inframerah dengan frekuensi tertentu, senyawa tersebut akan menyerap frekuensi. Jumlah frekuensi yang melewati senyawa akan diukur sebagai percentange transmittance atau presentasi transmitansi. Jika nilai presentase transmitasi bernilai 100% menunjukkan bahwa semua frekuensi dapat melewati senyawa tanpa ada yang terserap. Spektrum merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara panjang gelombang dan energi yang diserap oleh suatu senyawa yang dinyatakan dalam satuan cm-1. Sebuah molekul hanya menyerap frekuensi radiasi inframerah tertentu yang berkaitan dengan rentang frekuensi vibrasi. Rentang ini mencakup gerakan peregangan (stretching) dan pembengkokan (bending) pada sebagian besar ikatan molekul (Rohman et al., 2012)

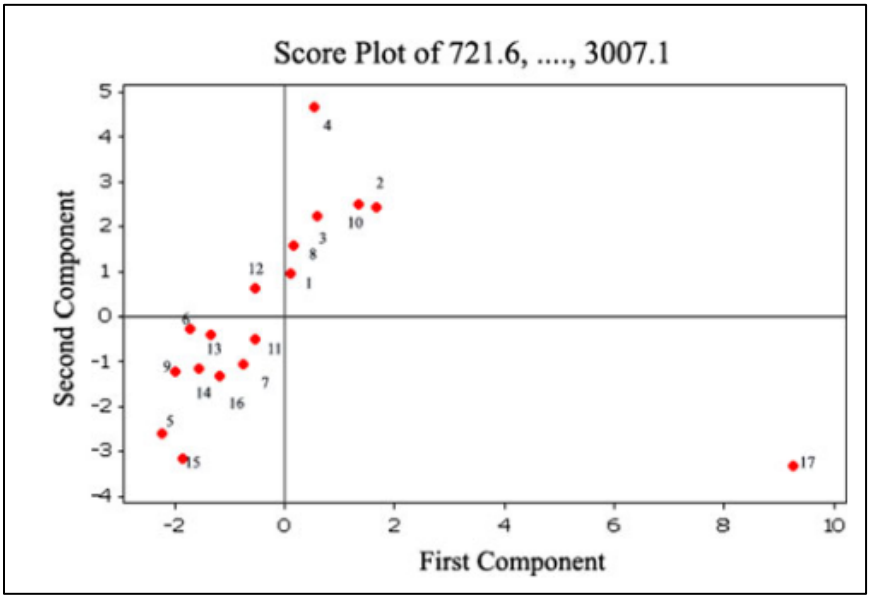
2.1.5 *Principal Component Analysis* (PCA)

Klasifikasi merupakan sebuah proses pencarian sekumpulan fungsi atau model yang menggambarkan dan membedakan kelas data dengan tujuan untuk memprediksi suatu objek yang belum diketahui kelas atau tingkatannya. Tujuan utama dalam proses klasifikasi data adalah untuk membangun sebuah model atau aturan yang dapat memprediksi atau mengklasifikasi kelas dari suatu data yang sebelumnya belum ada(Tazi, 2023). Klasifikasi sendiri terdiri dari dua proses yaitu membuat model klasifikasi dari kelas data yang sebelumnya sudah didefinisikan, dan menggunakan model tersebut untuk klasifikasi dataset serta mengukur akurasi model tersebut (Rahmi et al., 2020).

Principal Component Analysis (PCA) merupakan sebuah proses untuk mereduksi data yang dapat meningkatkan interpretabilitas tanpa menghilangkan atau mengurangi informasi yang dibutuhkan pada dimensi dataset tersebut.

Principal Component Analysis (PCA) termasuk dalam analisis faktor yang mana menggunakan metode pendekatan statistik yang dapat digunakan untuk menganalisis sebuah variabel dan dimensi serta menjelaskan faktor-faktor yang melandasinya. *Principal Component Analysis* (PCA) juga didefinisikan sebagai suatu titik dimensi dari sekumpulan kelompok data dengan variabel yang saling terkait dengan mengurangi kepadatan dari kumpulan data(Yudistira et al., 2018).

Tujuan utama dari *Principal Component Analysis* (PCA) adalah mereduksi dimensi yang besar dari sebuah ruang data (*observed variables*) menjadi dimensi yang kecil dari sebuah ruang fitur (*independent variables*) yang dibutuhkan untuk mendeskipsikan data sehingga data menjadi lebih sederhana dimana ruang fitur akan menjadi ciri yang digunakan sebagai kriteria dalam pengklasifikasian. *Principle Component* (PC) merupakan sebuah variabel baru dalam PCA dengan *principle component score* sebagai bentukan baru dari variabel tersebut. Variabel baru tersusun atas kombinasi linier variabel asli yang mana seluruh variabel baru tidak saling berkolerasi (Tazi et al., 2016).



Gambar 2. 10 Score Plot (Che Man et al., 2011)

Gambar 2.10 merupakan hasil visualisasi 2D dari komponen utama PCA berdasarkan data spektral yang dihasilkan dari pengujian FTIR diberbagai macam sampel minyak dan lemak yang dilakukan oleh (Che Man, 2011) dengan tujuan untuk mengetahui perbedaan kandungan di berbagai sampel lemak dan minyak dengan jumlah keseluruhan sampel adalah 17 jenis minyak yang berbeda, data spektral yang dihasilkan dari pengujian FTIR seringkali memiliki dimensi besar dan kompleksitas yang tinggi sehingga *Principal Component Analysis* (PCA) digunakan untuk mereduksi dimensi data dengan mentransformasikan variabel yang berkolerasi menjadi data yang berdimensi lebih sederhana. Gambar 2.10 menunjukkan hasil *Score Plot* dari 17 lemak dan minyak sebagai sampel yang diproyeksikan oleh komponen utama pertama (PC1) dan kedua (PC2). PC1 mewakili 44,1% dan PC2 mewakili 30,2% dari keseluruhan data, sehingga total keseluruhan data yang digunakan adalah 74,4%. Komponen utama ini merupakan kombinasi linier dari variabel asli yang mampu membantu dalam mengidentifikasi dan menganalisis pola serta variasi dalam spektral (Che Man et al., 2011).

Perhitungan *Principal Component Analysis* (PCA) menggunakan kumpulan data yang distandarisasi yang tersusun dari nilai *Eigen* dan kelompok variabel data awal. Adapun algoritma *Principal Component Analysis* (PCA) secara umum adalah sebagai berikut (Tazi, 2023) :

a. Standarisasi Data

   Standarisasi data dilakukan dengan mengurangi rata-rata dari setiap dimensi, jadi semua nilai X dan Y dikurangi nilai rata-ratanya, dimana proses ini akan menghasilkan dataset dengan rata-rata 0 dan varians 1.

b. Menghitung Matriks Kovarians

Matriks kovarians dihitung dari data yang sudah distandarisasi untuk mengidentifikasi hubungan antara fitur dalam dataset, matriks kovarians ini adalah matriks diagonal *A* dengan rumus sebagai berikut :

$$A = cov(xy) = \frac{\sum xy}{n} - \overline{x}\overline{y} \quad (1)$$

c. Menghitung *Eigenvector* dan *Eigenvalue*

Eigenvector adalah sebuah vektor yang menunjukkan arah komponen baru, sedangkan *Eigenvalue* merupakan sebuah bobot yang merepresentasikan dan menggambarkan pentingnya setiap komponen dari *Eigenvector.* Nilai eigen λ dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$(A - \lambda I) = 0 \quad (2)$$

Sementara itu, nilai *Eigenvector* X dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan berikut :

$$|A - \lambda . I| = 0 \quad (3)$$

Dimana :

A : matriks data

λ : nilai eigen

I : matriks identitas

d. Pemilihan Komponen Utama

Nilai *eigenvector* ditentukan berdasarkan *eigenvalue* secara menurun dan dipilih nilai *k* untuk nilai *eigenvector* teratas untuk menjadi komponen utama. Jumlah *k* ditentukan berdasarkan seberapa banyak informasi yang ingin dipertahankan dalam dataset tersebut.

e. Transformasi Data

Principle Component (PC) atau variabel baru diperoleh dengan cara mengalihkan variabel asli dengan matriks *Eigenvector* yang telah dipilih.

f. Menentukan Nilai Proporsi

Proporsi nilai *Principle Component* (PC) dapat ditentukan berdasarkan kontribusi masing-masing nilai Eigen. Berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung proporsi nilai *Principle Component* (PC) :

$$Proporsi\ PC_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{D} \lambda_i} \times 100\% \quad (4)$$

2.1.6 Kesegaran Ikan dalam Prespektif Islam

Ikan merupakan salah satu organisme yang memiliki banyak manfaat, salah satu manfaat yan dimiliki oleh organisme ini adalah kadar protein hewani yang relatif tinggi dan asam lemak tidak jenuh serta sumber vitamin A yang sangat dibutuhkan oleh manusia (Amrullah, 2023). Dalam prespektif islam, ikan menjadi salah satu makhluk yang disebutkan khusus dalam Al-Qur'an. Setidaknya terdapat beberapa ayat yang membahas tentang ikan sebagai sumber pangan bagi manusia yang tentunya merupakan salah satu hewan yang sudah dijamin kehalalannya, diantara lain adalah QS. an-Nahl (16):14, QS al-Maidah (6) : 96, QS al-Baqarah (2):168 dan QS Taha (20): 81.

Salah satu ayat yang secara eksplisit menyebutkan tentang kesegaran ikan sebagai makanan yang dianjurkan terdapat dalam QS. an-Nahl (16):14 yang menyebutkan bahwa manusia diperbolehkan memanfaatkan hasil laut termasuk daging ikan yang segar لَحْمًا طَرِيًّا sebagai rezeki yang baik. Ayat ini menjadi dasar pemahaman bahwa kesegaran dalam makanan termasuk ikan, adalah aspek yang

penting dalam ajaran Islam dan mencerminkan prinsip halalan tayyiban sebagai makanan yang halal dan baik bagi tubuh.

Dalam perspektif Islam, makanan yang *tayyib* berarti harus dalam kondisi baik, bersih, tidak membahayakan tubuh, dan layak dikonsumsi. Ikan yang sudah tidak segar dapat mengalami pembusukan yang menghasilkan senyawa-senyawa berbahaya bagi tubuh, seperti amonia, histamin, dan senyawa hasil dekomposisi protein lainnya. Oleh karena itu, mengonsumsi ikan dalam kondisi segar menjadi bagian dari upaya menjaga kesehatan, yang juga merupakan salah satu tujuan syariat Islam (*maqashid syariah*), yaitu menjaga jiwa (*hifz al-nafs*). Dengan demikian, kesegaran ikan tidak hanya penting dari sisi kesehatan, tetapi juga bernilai ibadah karena termasuk dalam menjalankan perintah Allah untuk mengonsumsi makanan yang halal dan baik.(Amrullah, 2023)

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimen, yang mana akan dilakukan analisa gugus fungsi dari proses pembusukan ikan tawar menggunakan data yang dihasilkan melalui pengujian *Fourier Transform Infrared (FTIR).* Sampel yang akan digunakan ialah daging ikan lele dan data hasil pengujian akan diklasifikasikan serta diolah menggunakan metode *Principle Component Analysis* (PCA).

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tentang monitoring kebusukan ikan air tawar menggunakan analisis gugus fungsi ini berbasis data yang dihasilkan melalui pengujian spektroskopi FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) dengan metode klasifikasi PCA (*Principle Component Analysis*). Pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan November 2024, bertempat di Laboratorium Fisika UIN Malang. Proses Freeze Drying dan Spektroskopi FTIR dilakukan di laboratorium Universitas Islam Malang (UNISMA).

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Alat Penelitian

Adapun alat yang digunakan untuk penelitian adalah sebagai berikut :

1. Alat Spektroskopi FTIR
2. Alat Freeze Drying
3. Perangkat PC
4. Pipet

5. Penggiling atau Homogenizer
6. Kuas atau Spatula
7. Thin-wall box
8. *Software* Origin2024b

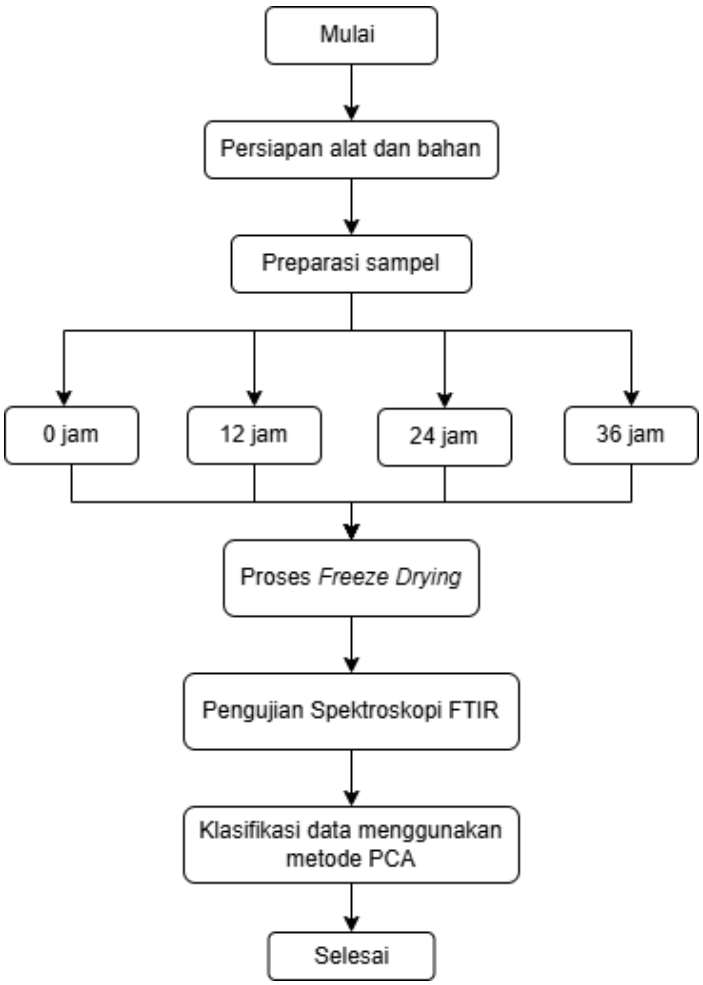
3.3.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan untuk penelitian adalah sebagai berikut :

1. Sampel daging ikan lele
2. Pelarut (jika diperlukan)

3.4 Prosedur Kerja

Berikut merupakan diagram alir penelitian :



3.5 Preparasi Sampel

1. Penelitian ini menggunakan sampel berupa daging ikan yang sudah dipisahkan dari tulang dan kepalanya, sampel kemudian dihaluskan dengan cara di blender tanpa diberi tambahan apapun, setelah daging ikan halus, sampel dibagi menjadi 4 bagian dengan berat masing-masing 50 gram dan disimpan pada wadah dengan diberi sirkulasi udara di suhu ruang antara 27^{o}C sampai 29 27^{o}C (Rohman, 2021) untuk dibiarkan selama 0 jam, 12 jam, 24 jam dan 36 jam.
2. Sampel dibekukan pada suhu rendah sebelum dilakukan proses Freeze Drying
3. Dilakukan proses Freeze Drying untuk mengeringkan sampel tanpa merusak senyawa-senyawa yang terkandung dalam sampel.
4. Dilakukan pengujian Spektroskopi FTIR.

3.6 Analisis Data

Analisis data pada penelitian ini menggunakan metode klasifikasi PCA. Pengambilan data dilakukan pada sampel ikan lele yang diuji menggunakan Spektroskopi FTIR dengan waktu simpan yang berbeda beda. Data yang diambil berupa spektrum gelombang absorbsi pada panjang gelombang tertentu, dimana spektrum tersebut menggambarkan gugus fungsi pada sampel. Pengolahan data dengan metode PCA dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Origin2024b

Berikut merupakan rencana tabel pengambilan data hasil penelitian :

No.	Sampel	Gugus Fungsi	Rentang Bilangan gelombang	Nilai Absorbansi
1.	Sampe 0 jam			
2.	Sampel 12 jam			
3.	Sampel 24 jam			
4.	Sampel 36 jam			

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Preparasi Sampel

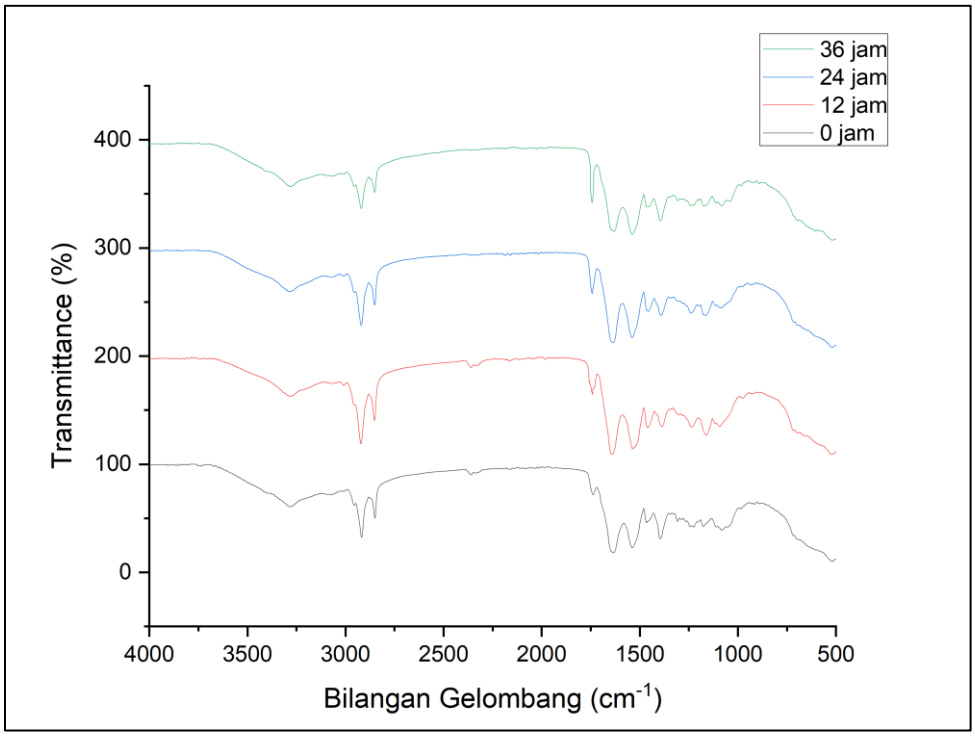
Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah ikan lele lokal dalam keadaan masih hidup yang diperoleh di salah satu ruko pasar di Kota Malang. Sebelum dilakukan pengujian FTIR dilakukan preparasi pada sampel ikan lele dengan membersihkan dan memisahkan daging ikan dari kepala, tulang dan isi perutnya, setelah itu daging ikan lele akan dihaluskan dengan cara diblender dan akan dibagi menjadi 4 bagian dengan berat masing-masing 30 gram. Sampel daging lele tersebut akan disimpan pada *Thinwall Box* yang sudah diberi label tanda variasi jam kemudian ditutup menggunakan kain kasa supaya tetap ada sirkulasi udara dan dibiarkan pada suhu ruang agar sampel mengalami proses pembusukan sesuai dengan variasi jam yang sudah ditentukan. Setelah pembusukan sampel sudah mencapai variasi jam yang ditentukan selanjutnya dilakukan pengeringan pada sampel dengan suhu rendah menggunakan alat *Freeze Dry* di Laboratorium Terpadu Universitas Islam Malang, untuk meminimalisir kadar air dan tetap mempertahankan struktur asli serta gugus fungsi yang terkandung pada sampel. Setelah sampel sudah mengering maka sampel siap diuji dengan menggunakan alat *Fourier Transform Infrared* (FTIR).

Gambar 4. 1 Sampel Daging Lele

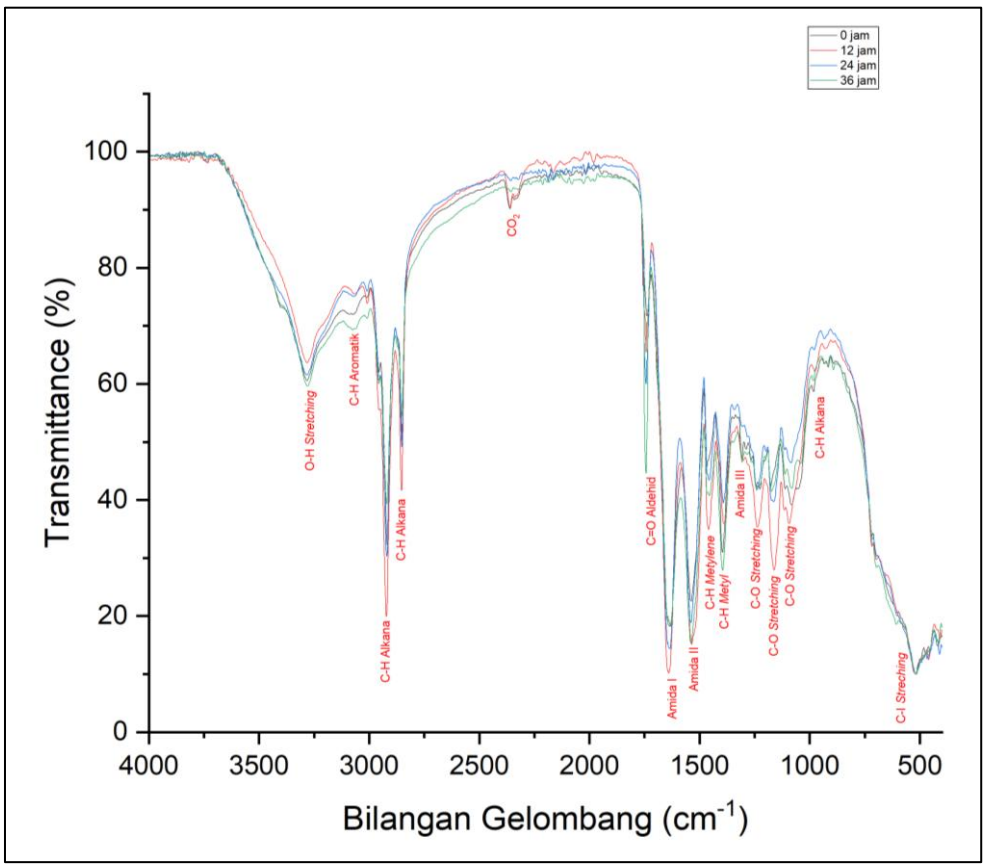
4.2 Hasil Pengujian Sampel Menggunakan FTIR

Sampel ikan yang sudah dibagi sesuai dengan variasi jam (0 jam, 24 jam, 24 jam dan 36 jam) kemudian diuji menggunakan spektroskopi FTIR. Pengujian FTIR dilakukan dengan memaparkan radiasi inframerah pada sampel, dengan sebagian radiasi diserap oleh ikatan kimia dalam sebuah molekul, sehingga menyebabkan vibrasi tertentu pada gugus fungsi seperti perenggangan (*Stretching*) dan pembengkokan (*Bending*). Sehingga dihasilkan data berupa nilai bilangan gelombang dan nilai absorbansi pada masing-masing variasi waktu. Nilai bilangan gelombang akan menunjukkan vibrasi dari struktur kimia atau gugus fungsi yang terkandung dalam sampel ikan yang merupakan hasil interaksi dari senyawa-senyawa kimia dalam matriks sampel yang kompleks, sedangkan nilai absorbansi berhubungan secara linier dengan jumlah konsentrasi penyusun molekul dalamm sampel tersebut (Saputri et al., 2023).

Pada penelitian ini, tidak semua puncak yang muncul dalam spektrum FTIR akan dianalisis. Analisis spektrum akan difokuskan pada puncak-puncak yang berhubungan dengan kandungan utama yang dapat mempengaruhi mutu ikan, misalnya kadar air, struktur protein dan karbohidrat serta stabilitas dari lipid. Hasil grafik pembacaan spektrum FTIR pada 4 sampel ikan dengan rentang bilangan gelombang antara 4000 cm^{-1} sampai 500 cm^{-1} dapat dilihat pada gambar 4.2



Gambar 4. 2 Grafik Spektrum FTIR pada 4 Sampel



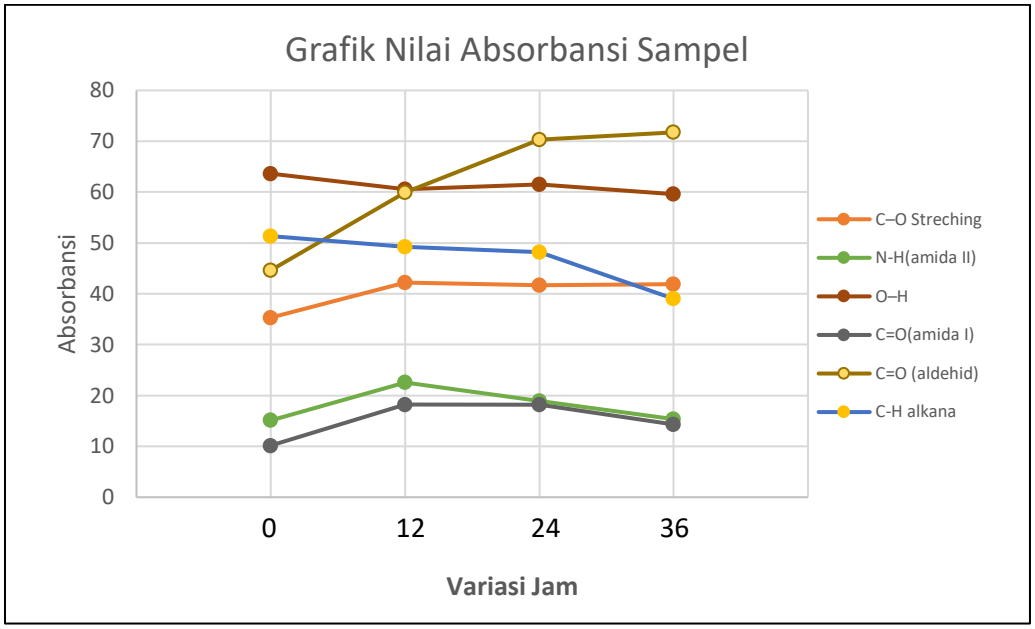
Gambar 4. 3 Grafik Spektrum FTIR pada 4 Sampel

Dari gambar 4.2 dan 4.3 dapat dianalisis bahwa hasil spektrum dari keempat sampel (0 jam, 12 jam, 24 jam dan 36 jam) memiliki pola yang hampir sama, hanya intensitasnya yang berbeda. Perbedaan intensitas pada nilai absorbansi dapat disebabkan oleh berbagai hal, misalnya adanya perubahan konsentrasi dari setiap gugus fungsi, terjadinya degradasi protein dan reorganisasi molekul serta perubahan kompoisisi biokimia saat penyimpanan selama proses pembusukan (Cheng et al., 2013). Pada gambar 4.2 dan 4.3 juga dapat diindikasikan bahwa tidak terjadi adanya pergeseran puncak secara signifikan dari setiap gugus fungsinya, mesksipun ada yang mengalami pergeseran puncak akan tetapi masih termasuk dalam rentang bilangan gelombang yang sama. Dari setiap bilangan gelombang yang dihasilkan dari pengujian FTIR pada setiap sampel, dapat ditentukan gugus fungsi serta nilai absorbansinya. Berikut merupakan tabel puncak-puncak rentang bilangan gelombang beserta gugus fungsinya (Wiley, 2001):

Tabel 4. 1 Gugus Fungsi dan Bilangan Gelombang

No	Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang(cm^{-1})
1	C-I *Streching*	500-600
2	C-H *Bending* (alkena)	960-980
3	C–O *Streching*	1050-1100
		1125-1205
		1180-1260
4	CN *Streching* (Amida III)	1210-1320
5	C-H *Bending* (metyl)	1380-1400
6	C-H *Bending* (methylene)	1450-1470
7	N-H *Bending* (Amide II)	1510-1560
8	C=O *Streching* (Amide I)	1630-1680
9	C=O *Streching* (aldehid)	1735-1750
10	C-H *Streching* (Alkana)	2850-3000
11	C-H *Streching* (aromatik)	3010-3100
12	O–H *Streching*	3200-3500

Dari hasil tabel 4.1 didapatkan berbagai daerah serapan yang mengindikasikan gugus fungsi tertentu yang terkandung dalam sampel ikan, hasil tabel menunjukkan bahwa puncak C-O *Streching* muncul ketika rentang panjang gelombang di antara 1150-1100 cm^{-1}, 1125-1205 cm^{-1} dan 1180-1260 cm^{-1}, yang menunjukkan adanya kandungan karbohidrat, puncak Amida I dan Amida II yang menunjukkan kandungan protein muncul di rentang bilangan gelombang 1630-1680 cm^{-1} dan 1510-1560 cm^{-1}, pada rentang bilangan gelombang 3200-3500cm^{-1} muncul puncak O-H *Streching* yang menunjukkan adanya kadar air pada sampel dan puncak C-H *Streching* yang menindikasikan adanya kandungan lipid terlihat pada rentang bilangan gelombang 2850-3100 cm^{-1} serta senyawa hasil oksidasinya, yaitu berupa aldehida atau keton yang ditunjukkan pada rentang bilangan gelombang 1735-1750 (C=O *Streching*). Dari gugus fungsi tersebut akan dihasilkan nilai absorbansi yang berbeda-beda sehingga dapat diketahui bagaimana perubahan mutu pada sampel ikan selama proses pembusukan. Berikut merupakan penjelasan tentang masing-masing perubahan mutu yang dialami oleh sampel ikan diberbagai jam.

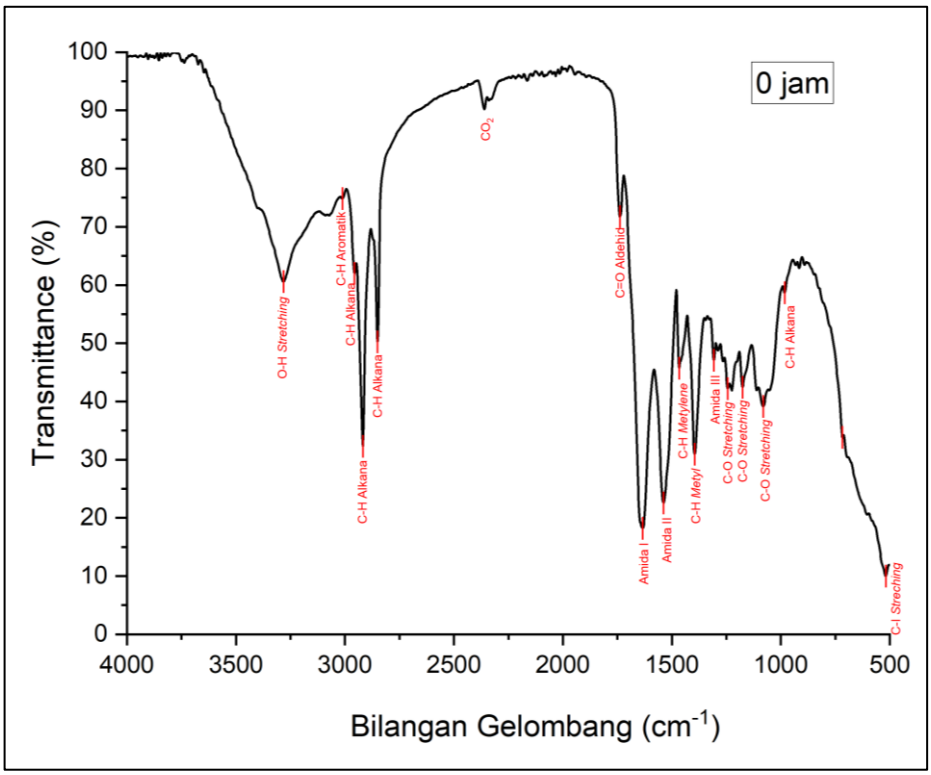


Gambar 4. 4 Grafik Nilai Absorbansi pada Sampel

Berdasarkan grafik 4.4 terlihat bahwa terjadi perubahan signifikan pada intensitas absorbansi terhadap beberapa gugus fungsi seiring meningkatnya waktu pembusukan. Gugus C–H alkana menunjukkan penurunan nilai absorbansi yang konsisten dari 0 hingga 36 jam, yang dapat diartikan sebagai berkurangnya kandungan senyawa hidrokarbon alifatik akibat proses degradasi atau oksidasi selama pembusukan. Hal serupa juga terlihat pada gugus C=O (aldehid), di mana terjadi peningkatan nilai absorbansi secara konsisten yang menunjukkan terus meningkatnya pembentukkan senyawa aldehida yang dihasilkan dari proses oksidasi lipid. Sementara itu, gugus C=O amida I dan N–H amida II, yang merupakan penanda utama protein, menunjukkan fluktuasi nilai absorbansi dengan penurunan absorbansi yang mencerminkan proses degradasi protein secara bertahap. Perubahan ini mencerminkan terjadinya denaturasi dan pemecahan ikatan peptida, yang merupakan ciri khas pembusukan jaringan otot ikan. Gugus O–H cenderung mengalami penurunan meskipun tidak signifikan, menunjukkan bahwa kadar air mengalami perubahan yang tidak terlalu drastis. Secara

keseluruhan, penurunan nilai absorbansi menunjukkan penurunan jumlah senyawa penyerap inframerah, yang sejalan dengan proses degradasi biokimia selama pembusukan ikan.

4.2.1 Analisis Hasil FTIR Sampel Daging Lele 0 Jam



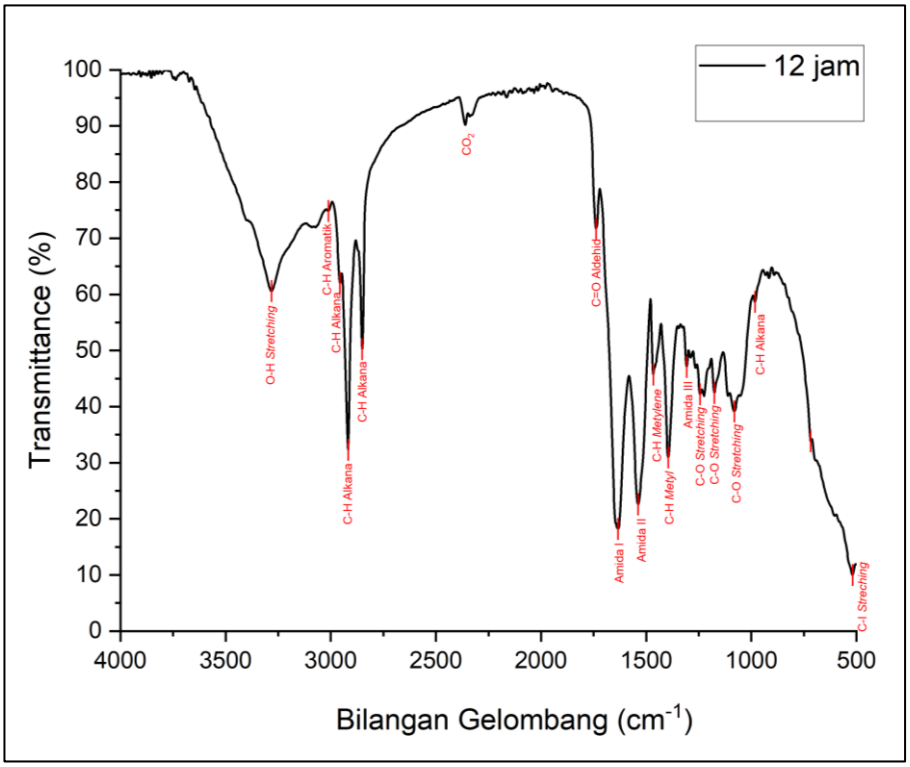
Gambar 4. 5 Spektrum FTIR Pada Sampel 0 Jam

Berdasarkan gambar 4.5 Hasil analisis FTIR pada sampel daging ikan lele yang diambil pada 0 jam menunjukkan adanya dua puncak utama pada bilangan gelombang 1640.14 cm^{-1} dan 1536.03 cm^{-1}, yang masing-masing mewakili gugus fungsi amida I dan amida II. Gugus amida I terkait dengan getaran regangan (stretching) C=O, sedangkan amida II berhubungan dengan kombinasi getaran lentur (bending) N–H. Kedua gugus ini berfungsi sebagai indikator keberadaan struktur protein yang utuh dalam jaringan ikan. Nilai absorbansi pada puncak-puncak ini menunjukkan bahwa protein dalam daging ikan masih dalam kondisi

segar dan belum mengalami degradasi yang signifikan akibat proses autolisis atau aktivitas mikroorganisme.

Selain itu, bilangan gelombang 2852.42 cm^{-1} dan 2922.31 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi C–H stretching dari rantai alifatik, yang berkaitan dengan kandungan lipid atau lemak dalam daging ikan. Intensitas tinggi pada puncak ini mengindikasikan bahwa komposisi lemak dalam jaringan masih stabil dan belum teroksidasi, yang menandakan kualitas lemak yang baik pada awal penyimpanan. Di sisi lain, bilangan gelombang 3281.71 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi O–H stretching yang berkaitan dengan keberadaan air, baik dalam bentuk air bebas maupun air yang terikat pada matriks protein. Kandungan air ini sangat penting untuk menjaga tekstur dan integritas struktural daging ikan. Selain gugus fungsi pada kandungan utama sampel ikan, muncul juga puncak dengan bilangan gelombang 2366 cm^{-1} yang mengindikasikan senyawa dari molekul karbon dioksida (CO_2) yang berasal dari sisa metabolisme alami ikan(Good et al., 2010) dimana pada keadaan sampel 0 jam nilai absorbansi dari senyawa ini masih tinggi yang menunjukkan bahwa senyawa karbon dioksida masih tersimpan dalam jaringan ikan dan belum mengalami penguapan atau penguraian yang disebabkan oleh mikroorganisme pada proses kebusukan. Intensitas tinggi pada puncak-puncak senyawa yang dihasilkan ini menunjukkan bahwa struktur jaringan ikan masih utuh dan belum mengalami penguapan atau kerusakan akibat degradasi. Secara keseluruhan, spektrum FTIR pada sampel 0 jam mengindikasikan bahwa daging ikan lele masih dalam kondisi sangat segar dengan struktur biokimia yang belum mengalami perubahan signifikan.

4.2.2 Analisis Hasil FTIR Sampel Daging Lele 12 Jam



Gambar 4. 6 Spektrum FTIR Pada Sampel 12 Jam

Pada waktu penyimpanan selama 12 jam, spektrum FTIR pada gambar 4.6 menunjukkan terjadinya perubahan signifikan pada nilai absorbansi di beberapa gugus fungsi utama, terutama pada bilangan gelombang yang mewakili protein, air, dan lemak. Absorbansi pada bilangan gelombang sekitar 3280 cm^{-1} yang merepresentasikan gugus O–H stretching mengalami penurunan dibandingkan dengan sampel 0 jam. Penurunan ini mengindikasikan mulainya pelepasan air bebas dari jaringan otot ikan sebagai akibat dari kerusakan seluler awal. Hilangnya air ini juga bisa menjadi tanda terjadinya autolisis, yaitu proses enzimatik dari dalam tubuh ikan sendiri yang memecah jaringan pasca-mortem (Lestari, 2020).

Selanjutnya, nilai absorbansi pada gugus Amida I (1634 cm^{-1}) dan Amida II (1538 cm^{-1}) mengalami peningkatan intensitas dibandingkan kondisi segar.

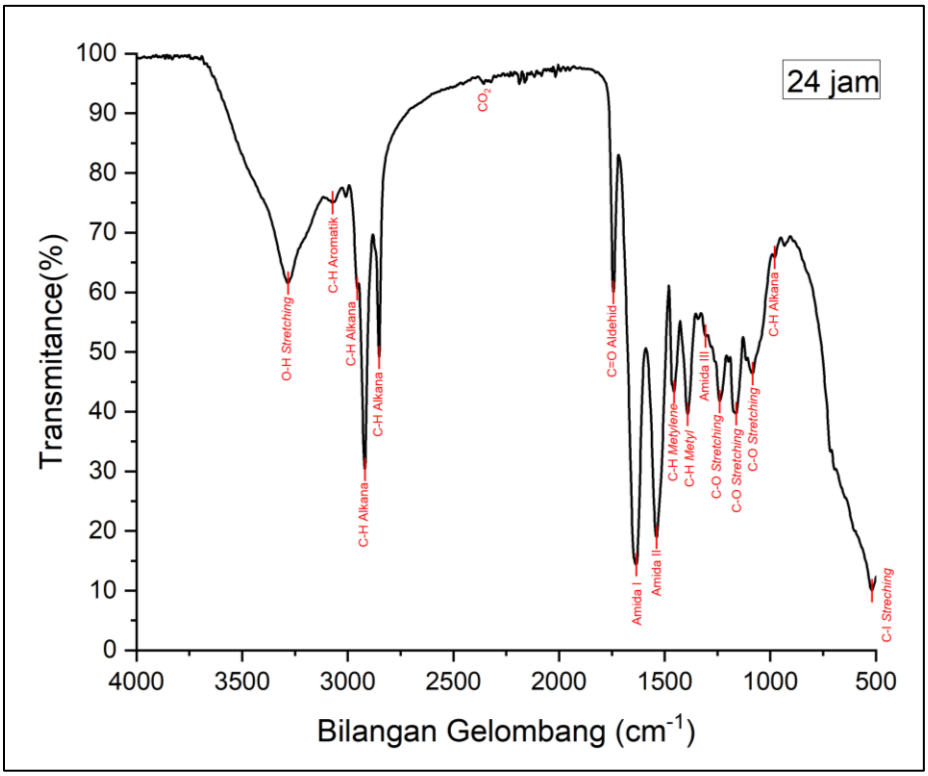
Peningkatan ini bisa dikaitkan dengan fragmentasi awal protein, yaitu saat ikatan peptida dalam protein mulai pecah akibat aktivitas enzim proteolitik (Yu et al., 2017). Ikatan-ikatan yang sebelumnya kaku menjadi lebih bebas bergetar, menyebabkan peningkatan daya serap terhadap radiasi inframerah. Fenomena ini juga menunjukkan bahwa struktur sekunder protein mulai mengalami gangguan, meskipun belum sepenuhnya terdenaturasi (Kobayashi et al., 2019)

Di sisi lain, absorbansi pada bilangan gelombang 2956–2851 cm^{-1} yang merepresentasikan gugus C–H stretching dari rantai alifatik (lipid) menunjukkan perubahan intensitas, menandakan bahwa oksidasi lemak mulai terjadi meskipun belum secara signifikan. Namun, stabilitas ini bersifat sementara dan akan terganggu seiring berjalannya waktu penyimpanan. Intensitas puncak pada bilangan gelombang 2366 cm^{-1} yang menunjukkan senyawa CO_2 juga masih terdeteksi dan memiliki nilai absorbansi yang relatif tinggi, meskipun lebih rendah jika dibandingkan dengan sampel 0 jam. Perubahan pada daerah ini pada tahap 12 jam dianggap sebagai fase awal pembusukan, di mana mulai terjadi proses autolisis dan aktivitas mikroorganisme sehingga menyebabkan mutu sensorik ikan mengalami penurunan meskipun belum banyak berubah tetapi proses biokimia internal telah dimulai.

Secara keseluruhan, kondisi spektrum pada 12 jam memperlihatkan bahwa ikan telah memasuki fase transisi dari kesegaran menuju pembusukan. Kandungan air mulai menurun, struktur protein mulai terganggu, dan proses degradasi internal mulai aktif. Ini sesuai dengan teori fase prerigor/postprerigor yang menyebutkan bahwa setelah beberapa jam pasca-mati, enzim-enzim seperti protease dan lisosom mulai aktif dan mengubah struktur jaringan dari dalam

(Silvana et al., 2018). Dengan demikian, meskipun secara visual ikan mungkin masih tampak baik, secara kimiawi mutunya sudah mulai menurun, dan ini terekam secara jelas dalam spektrum FTIR melalui perubahan nilai absorbansi pada gugus fungsi.

4.2.3 Analisis Hasil FTIR Sampel Daging Lele 24 Jam



Gambar 4. 7 Spektrum FTIR Pada Sampel 24 Jam

Dari gambar 4.7 dapat dianalisa bahwa pada penyimpanan selama 24 jam, spektrum FTIR menunjukkan perubahan besar pada struktur kimiawi daging ikan, yang menandakan masuknya ikan ke fase degradasi aktif. Absorbansi pada gugus amida I (1634 cm^{-1}) dan amida II (sekitar 1538 cm^{-1}) mengalami penurunan intensitas dibandingkan dengan jam ke-12. Penurunan ini menunjukkan denaturasi lanjut pada protein otot, di mana ikatan peptida sudah mulai terputus secara signifikan. Struktur sekunder protein telah mengalami peluruhan, sehingga kemampuan jaringan untuk mempertahankan elastisitas dan integritas

fungsionalnya pun menurun. Hal ini menandai penurunan kualitas gizi dan tekstur, serta mempercepat kerusakan daging.

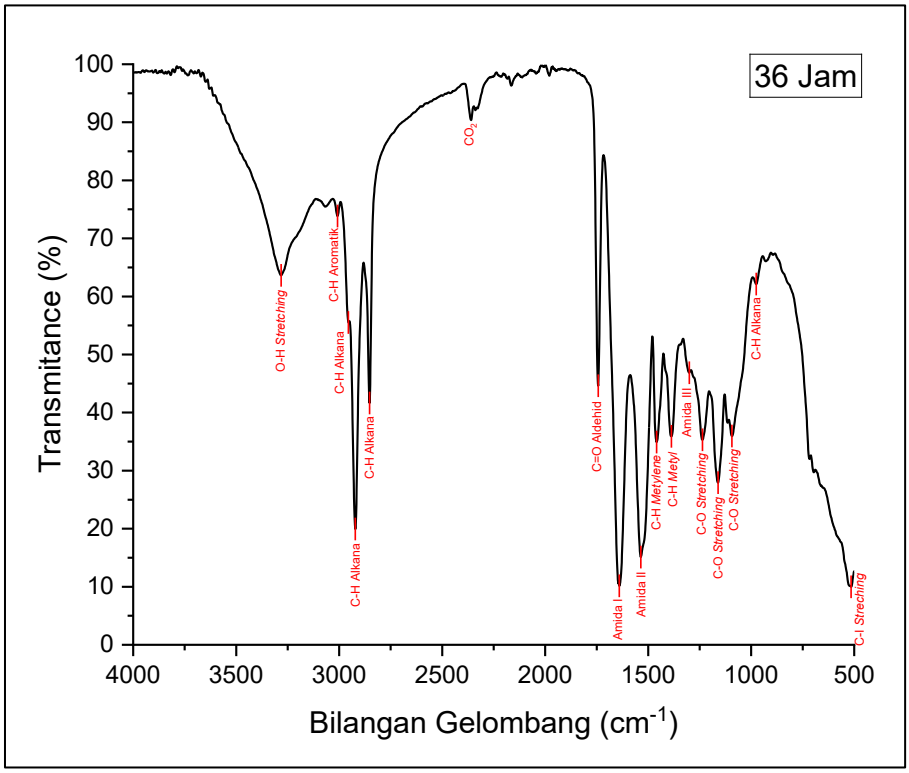
Penurunan absorbansi juga diamati pada bilangan gelombang sekitar 3283 cm^{-1} yang merepresentasikan gugus O–H *Stretching*. Ini mengindikasikan bahwa kandungan air semakin menurun, baik karena penguapan maupun pelepasan air akibat kerusakan membran sel. Penurunan kadar air ini berkontribusi pada pelunakan tekstur daging, serta perubahan viskositas dan stabilitas jaringan (Granke et al., 2015). Pada tahap ini, air tidak lagi terikat secara efektif dalam jaringan protein karena struktur protein sudah tidak stabil. Selanjutnya, mulai muncul puncak-puncak baru atau peningkatan intensitas pada bilangan gelombang 1735–1750 cm^{-1}, yang berkaitan dengan C=O stretching dari aldehida dan keton, senyawa hasil dari proses oksidasi lipid. Proses ini menghasilkan senyawa volatil seperti heksanal, malondialdehida, dan formaldehida, yang dikenal menyebabkan bau tengik khas ikan busuk (Lordan et al., 2017).

Kehadiran senyawa tersebut juga memperburuk mutu organoleptik ikan secara keseluruhan. Senyawa lain seperti karbon dioksida yg ditunjukkan oleh puncak dengan bilangan gelombang 2357 cm^{-1} terlihat semakin dangkal, hal ini menunjukkan terjadinya penurunan nilai absorbansi pada senyawa CO_2, penurunan nilai absorbansi ini bisa disebabkan karena terjadinya pelepasan dan penguraian senyawa dari jaringan sebab proses penguapan, ataupun sebab kebusukan yang dapat merubahnya menjadi senyawa lain dan juga sebab peningkatan senyawa volatil lain pada tahap pembusukan lanjut sehingga menghasilkan puncak yang mendominasi, sehingga puncak CO_2 tidak lagi terlihat dominan.

Selain itu hasil FTIR juga menunjukkan perubahan pada rentang 1050–1260 cm^{-1} yang berkaitan dengan gugus C–O stretching, sebagai tanda adanya perombakan karbohidrat struktural dalam jaringan otot dan kulit. Karbohidrat kompleks atau glikogen yang semula berperan sebagai sumber energi sudah terurai, dan kemungkinan telah menghasilkan senyawa fermentatif seperti asam laktat, asam asetat, atau alkohol ringan, akibat aktivitas mikroorganisme. Aktivitas ini sejalan dengan peningkatan populasi bakteri pembusuk seperti Pseudomonas dan Acinetobacter yang memecah senyawa-senyawa makromolekul (Sahubawa,2018).

Secara keseluruhan, pada jam ke-24, daging ikan telah mengalami kerusakan biokimia lanjutan yang ditandai dengan degradasi protein (amida), oksidasi lipid (aldehida/keton), pelepasan air (O–H), dan gangguan struktur karbohidrat. Kombinasi perubahan ini mengindikasikan bahwa mutu ikan telah berkurang secara drastis, dan bila dikonsumsi berisiko mengalami penurunan keamanan pangan, bahkan potensi keracunan.

4.2.4 Analisis Hasil FTIR Sampel Daging Lele 36 Jam



Gambar 4. 8 Spektrum FTIR Pada Sampel 36 Jam

Setelah mengalami pembusukan selama 36 jam, sampel ikan sudah menunjukkan perubahan struktur kimiawi yang lebih nyata dibandingkan jam-jam sebelumnya yang ditunjukkan oleh gambar 4.8. Penurunan absorbansi pada Amida I (1630 cm^{-1}) dan Amida II (1537 cm^{-1}) menandai terjadinya degradasi berat pada struktur protein yang sebagian besar disebabkan karena putusnya ikatan peptida akibat aktivitas enzimatik dan mikrobiologis. Hilangnya struktur sekunder pada protein ini menyebabkan hilangnya fungsi biologis dan mutu pada daging. Menurunnya nilai absorbansi pada gugus fungsi C-H *Streching* mengindikasikan berlanjutnya proses oksidasi pada lipid yang dibuktikan dengan meningkatnya absorbansi pada C=O *Streching*, hal ini menandakan adanya produk oksidasi yang terbentuk, seperti aldehida, keton dan asam ester dalam jumlah bebas yang memperparah bau tengik dan kerusakan sensori. Kadar air yang ditunjukkan oleh

gugus fungsi O-H *Streching* juga semakin mengalami pennurunan dibandingkan sebelumnya yang menyebabkan tekstur daging semakin lembek dan hancur. Proses pembusukan sampel ikan pada 36 jam ini telah mengalami kerusakan yang besar pada protein, lipid dan struktur jaringan lainnya, hal ini menandai bahwa jaringan ikan telah mengalami pembusukan berat dengan terjadinya penurunan mutu secara drastis baik secara kimiawi, tekstural maupun sensorik.

4.3 Analisis Hasil Pengolahan Data dengan Metode PCA

Hasil data pengujian FTIR yang menghasilkan nilai bilangan gelombang dan absorbansi kemudian akan dianalisis menggunakan metode PCA yang bertujuan untuk mengurangi kompleksitas sebuah kumpulan data yang besar untuk mendapatkan variabel data baru yang lebih sederhana tanpa menghilangkan banyak informasi ynag terkandung dalam variabel semula, karena memiliki dimensi yang lebih sederhana, PCA mampu menjadikan sebuah data menjadi lebih mudah dieksplorasi, divisualisasi dan dianalisis.

Data pengujian FTIR menghasilkan puncak-puncak spektrum yang pada masing-masing sampel memiliki bentuk puncak yang hampir sama, akan tetapi meskipun pola dan bentuk puncak spektrum ynag dihasilkan hampir sama dan memiliki kemiripan, terdapat perbedaan disetiap puncaknya yang dapat disebabkan karena adanya perbedaan nilai absorbansi atau intensitas pada masing-masing sampel. Kemiripan bentuk puncak spektrum pada masing-masing sampel tersebut menjadikan data susah dibedakan dan dianalisis, oleh karena itu digunakan metode PCA untuk mengetahui perbandingan dan perbedaan data secara spesifik dalam bentuk visual dan dimensi yang lebih sederhana.

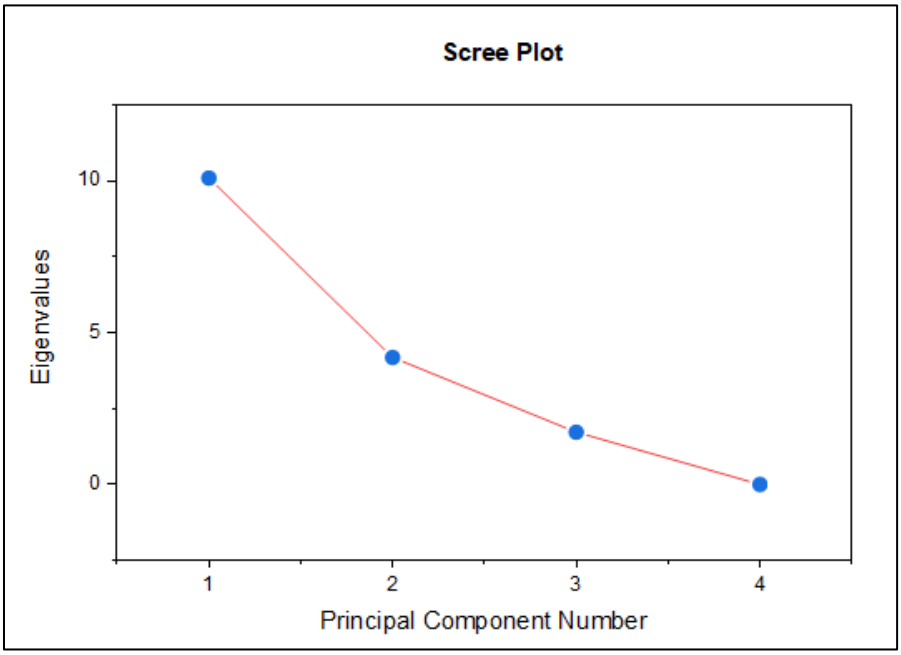
Software yang digunakan dalam pengolahan data metode PCA pada penelitian ini menggunakan aplikasi OriginPro yang mampu memberikan berbagai perintah dalam mempermudah proses pengolahan data. Berikut merupakan tabel hasil nilai eigen matriks dan korelasi.

Tabel 4. 2 Nilai Analisis Eigen Matriks Korelasi

PC	Nilai Eigen	Proporsi	Komulatif
PC1	10.09399	0,631	63,1%
PC2	4.18509	0,262	89,3%
PC3	1.72092	0.108	100%
PC4	0	0.000	100%

Tabel 4.2 merepresentasikan nilai eigen yang menunjukkan besarnya variasi data yang mampu dijelaskan oleh setiap komponen, proporsi dan komulatif dari masing-masing variabel sampel. Jumlah komponen utama yang dihasilkan akan sebanding dengan jumlah variabel awal yang digunakan, pada penelitian ini terdapat 4 variabel awal berupa perbedaan jam dalam proses pembusukan (0 jam, 12 jam, 24 jam dan 36 jam) dan dihasilkan 4 komponen utama. Dari data hasil pada tabel, dapat dianalisa bahwa dua komponen utama (PC1 dan PC2) mampu menjelaskan sebesar 89,3% dari total variasi data, yang menunjukkan akan perubahan kimiawi atau perubahan mutu yang terjadi pada sampel ikan selama proses pembusukan. Komponen pertama (PC1) memberikan kontribusi terbesar, yaitu 63,1% dan diikuti komponen kedua (PC2) sebesar 26,2%.

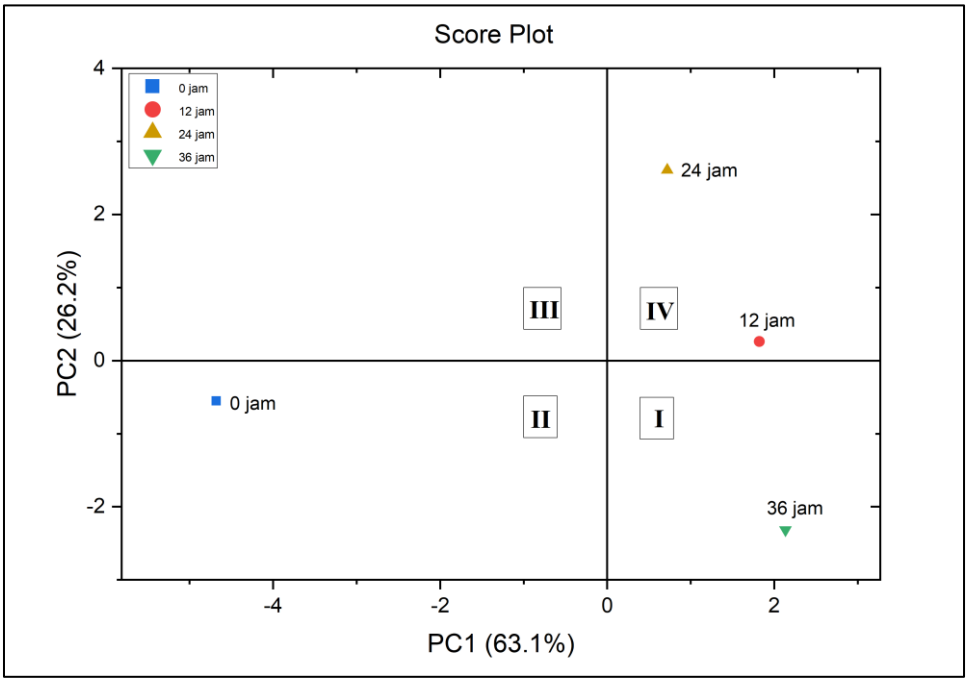
4.3.1 Hasil Scree Plot



Gambar 4. 9 Scree Plot Sampel

Gambar 4.9 merupakan hasil Scree Plot yang menggambarkan hubungan antara nilai eigen (eigenvalue) dan jumlah komponen utama (PC). Sumbu X mempresentasikan nomor komponen utama (PC1, PC2, PC3 dan PC4), sedangkan sumbu Y mempresentasikan nilai eigen dari masing-masing komponen utama. Tujuan utama Scree Plot adalah untuk menentukan jumlah komponen utama yang akan dipertahankan dalam menganalisis data hasil. Hasil Scree Plot memperlihatkan bahwa kurva mulai melandai pada PC2, yang mana hal ini menunjukkan bahwa terdapat 2 komponen utama (PC1 dan PC2) yang sudah dapat diambil untuk menginterpretasikan sekian banyak data perubahan mutu pada sampel ikan berdasarkan hasil spektrum FTIR selama proses pembusukan.

4.3.2 Hasil Score Plot *2D*

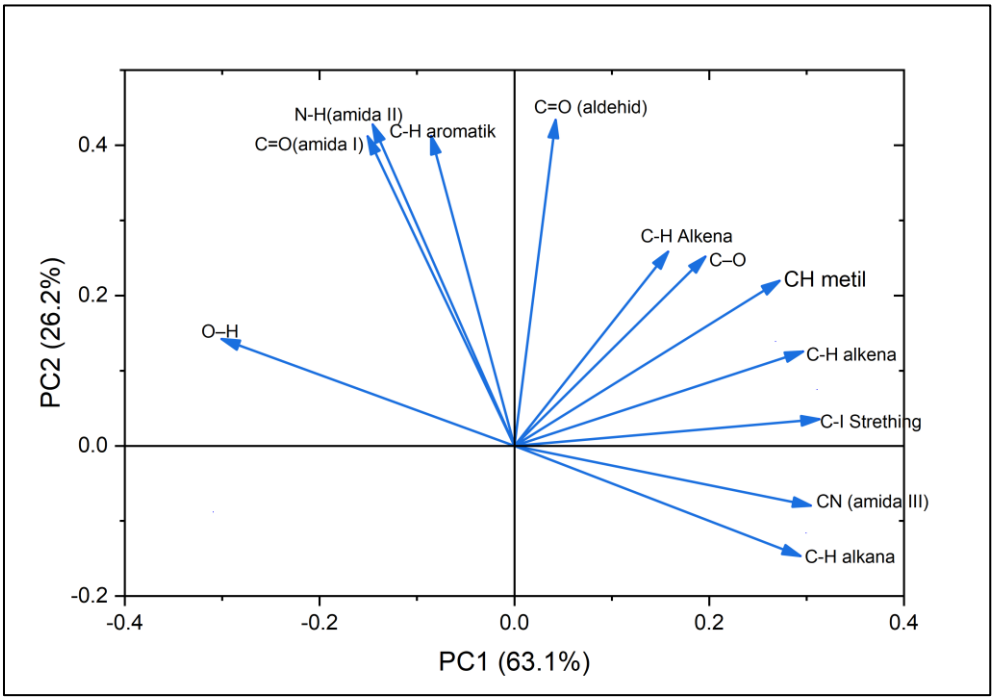


Gambar 4. 10 Score Plot Sampel

Gambar 4.10 merupakan hasil Score Plot visualisasi 2D yang diperoleh dari perwakilan 2 komponen utama, yaitu PC1 dan PC2. Berdasarkan hasil score plot PCA, sampel ikan pada waktu pemyimpanan 0 jam, 12 jam, 24 jam dan 36 jam dapat diploting dengan jelas dalam grafik PC1 dan PC2 yang dibatasi oleh garis *reference* (kuadran I, II, III dan IV). Dapat dilihat bahwa sampel 0 jam terploting pada kuadran II (negatif PC1 dan negatif PC2), sampel 12 jam dan 24 jam, keduanya terploting pada kuadran IV (positif PC1 dan positif PC2) serta yang terakhir sampel 36 jam pada kuadran I (positif PC1 dan negatif PC2). Jarak antara sampel satu dengan lainnya menunjukkan kemipiran akan perubahan mutu yang dialami dari setiap variasi jam pada proses pembusukan. Pergeseran posisi titik jarak sampel antara 0 jam (kuadran II) dengan sampel 12, 24 dan 36 jam (kuadran I dan IV) terlihat lebih jauh jika dibandingkan dengan jarak sampel 12, 24 dan 36 jam. Hal ini menandakan adanya perubahan struktur kimiawi yang terjadi secara

signifikan pada sampel 0 jam yang masih segar dengan keadaan air dan struktur protein yang masih utuh serta lipid yang belum teroksidasi (perubahan kualitas dari segar ke busuk). Sedangkan pada sampel 12, 24 dan 36 jam sudah berada pada tahap degradasi mutu yang sama (peningkatan dalam proses pembusukan) sehingga jarak antara ketiga titik sampel tidak begitu jauh.

4.3.3 Hasil Loading Plot



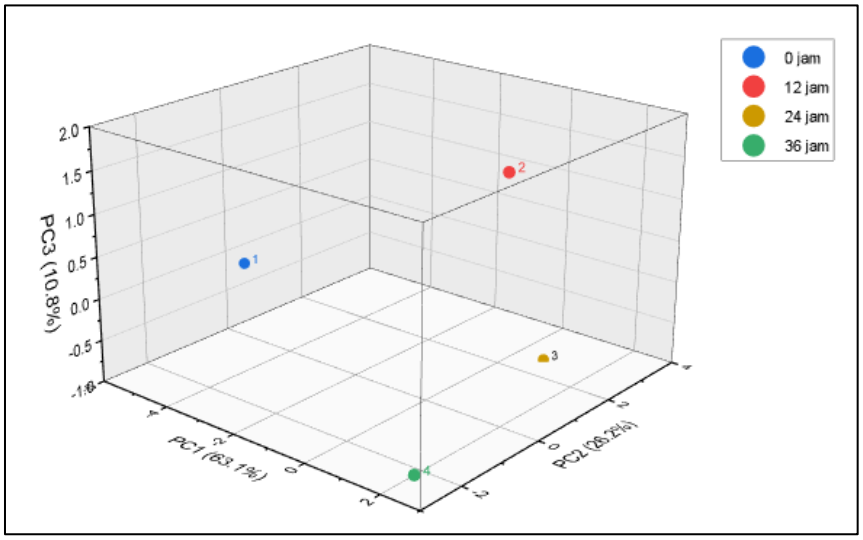
Gambar 4. 11 Loading Plot Sampel

Loading plot yang menunjukkan kontribusi dari masing-masing gugus fungsi berdasarkan nilai absorbansinya terhadap PC 1 dan PC2. Perubahan mutu sampel ikan pada proses pembusukan dapat dipetakan melalui kontribusi dari setiap gugus fungsi pada PC1 dan PC2. Sumbu X pada grafik Loading Plot mewakili variasi data sebesar 63,1% (PC1) dan sumbu Y mewakili variasi data sebesar 26,2% (PC2) yang mana jika 2 komponen tersebut dijumlah (PC1 dan PC2) maka akan mewakili variasi data sebesar 89,3%. Pada grafik yang dihasilkan dapat dilihat bahwa dominasi gugus fungsi terlihat dari arah vektor yang mewakili setiap variabel.

Berdasarkan grafik loading plot PCA yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 dapat diketahui bahwa gugus fungsi dengan resultan (vektor) paling panjang adalah C=O (aldehid), diikuti oleh Amida I, Amida II dan O-H *Stretching*. Panjang vektor pada loading plot mencerminkan besarnya kontribusi variabel (gugus fungsi) terhadap pembentukan komponen utama (PC1 dan PC2). Gugus C=O aldehid, yang merupakan hasil dari proses oksidasi lipid, menunjukkan kontribusi paling dominan, yang artinya perbedaan kandungan aldehid antar sampel sangat memengaruhi pemisahan kelompok dalam analisis PCA. Selain itu, senyawa Amida I,Amida II dan O=H *Stretching*, yang berhubungan dengan kandungan protein dan air, juga menunjukkan vektor yang panjang,mengindikasikan bahwa perubahan peptida hasil degradasi dan penguapan air sangat berperan dalam membedakan tahap-tahap pembusukan ikan.

Sebaliknya, gugus seperti C–H metil dan C–I stretching memiliki vektor yang lebih pendek, menunjukkan kontribusi yang lebih rendah terhadap variansi total data dengan posisi vektor mereka yang lebih dekat ke pusat koordinat menunjukkan bahwa perubahan absorbansi mereka antar waktu relatif lebih stabil, atau variasinya tidak sebesar gugus-gugus lainnya. Hasil ini memperkuat bahwa oksidasi lipid dan degradasi hidrokarbon merupakan faktor dominan dalam proses pembusukan ikan air tawar yang dapat dideteksi melalui kombinasi FTIR dan PCA.

4.3.4 Hasil Scatter Plot *3D*



Gambar 4. 12 Scatter Plot Sampel

Gambar 4.12 adalah grafik Scatter plot yang merupakan hasil visualiasasi 3D, diwakili dengan 3 komponen utama, yaitu PC1 pada sumbu X, PC2 pada sumbu Y dan PC 3 pada sumbu Z, hasil grafik ini hampir sama dengan scpre plot, akan tetapi score plot hanya sebatas 2D dengan 2 komponen utama (PC1 dan PC2) sedangkan scatter plot dapat memvisualisasi hingga 3D. Keunggulan scater plot dibanding score plot adalah komponen utama yang digunakan lebih maksimal dalam mewakili data yang ada. PC1 mewakili 63,1%, PC2 26,2% dan PC3 10,8% sehingga total kumulatif informasi pada data adalah 100%

4.3.5 Hasil Analisis Perbandingan Sampel

Penyimpanan daging ikan lele pada variasi waktu 0, 12, 24, dan 36 jam menyebabkan perubahan progresif pada komposisi kimia yang terdeteksi melalui analisis spektrum FTIR. Berdasarkan hasil pengolahan data, semua sampel menunjukkan keberadaan gugus fungsi utama yang serupa, meliputi gugus O–H, C–H, C=O, dan N–H, yang merepresentasikan keberadaan air, lipid, dan protein dalam jaringan ikan. Namun, intensitas absorbansi pada masing-masing gugus

fungsi mengalami perubahan yang berbeda-beda, mencerminkan dinamika degradasi kimiawi selama proses pembusukan.

Pada sampel 0 jam, daging ikan lele masih dalam kondisi segar, yang ditunjukkan oleh tingginya absorbansi pada daerah O–H (~3300 cm^{-1}) dan amida I/II (~1630–1540 cm^{-1}), menunjukkan kadar air yang tinggi dan struktur protein yang masih utuh. Puncak-puncak ini mengindikasikan bahwa pada saat itu jaringan ikan masih mempertahankan kestabilan strukturnya. Hal ini konsisten dengan posisi sampel 0 jam pada score plot PCA, yang terpisah jauh dari sampel lainnya, menunjukkan perbedaan karakter kimia yang signifikan.

Memasuki penyimpanan 12 jam, terjadi fragmentasi awal pada struktur protein dan lipid, ditandai dengan sedikit penurunan absorbansi pada gugus O–H dan perubahan pada puncak C–H dan C=O yang menandakan mulainya proses degradasi dapat yang disebabkan oleh aktivitas enzim, mikroorganisme dan aktivitas biokimia lainnya yang tidak terkontrol, sehingga mulai muncul perubahan baik itu pada warna, bau dan tekstur ikan itu sendiri. (Leiwakabessy et al., 2024).Meskipun perubahan ini belum drastis, namun posisi sampel 12 jam dalam score plot mendekati sampel 24 dan 36 jam, menunjukkan bahwa secara kimiawi, ikan telah mulai memasuki fase pembusukan.

Pada sampel 24 jam, perubahan kimia semakin nyata. Penurunan absorbansi pada amida I dan II semakin besar, menunjukkan degradasi struktur protein yang lebih lanjut. Selain itu, absorbansi gugus C=O mulai meningkat, mengindikasikan terbentuknya produk oksidasi lipid seperti aldehid dan keton. Menurunnya kadar air pada sampel 24 jam berjalan seiring dengan menurunya nilai pH dan ATP dari

jaringan otot daging(Lemae & Lasmi, 2016). Peningkatan produk oksidasi ini mempercepat penurunan mutu daging ikan baik secara kimiawi maupun sensorik.

Sampel 36 jam menunjukkan perubahan kimiawi yang paling drastis. Absorbansi pada daerah karbonil (C=O ~1740 cm^{-1}) semakin tinggi, sementara absorbansi O–H dan amida semakin melemah. Ini menunjukkan bahwa ikan telah mengalami pembusukan lanjut, dengan degradasi berat pada protein dan oksidasi lipid yang menghasilkan banyak produk degradasi seperti aldehid. Posisi sampel 36 jam di score plot terletak jauh di sepanjang arah PC1, memperkuat bahwa mutu daging ikan telah mengalami penurunan secara substansial dibandingkan waktu awal penyimpanan.

Walaupun gugus fungsi yang terdeteksi pada semua sampel tetap sama, perubahan mutu dapat diidentifikasi melalui pola perubahan intensitas absorbansi secara keseluruhan. Proses pembusukan yang berlangsung menyebabkan variasi absorbansi yang tidak linier karena adanya reaksi kimia kompleks seperti denaturasi protein, oksidasi lipid, dan perubahan kadar air. Dengan analisis PCA, pola perubahan ini dapat dipetakan secara jelas sehingga mampu membedakan tingkat kesegaran dan pembusukan ikan berdasarkan spektrum FTIR.

4.4 Kajian Integrasi Islam

يٰٓاَيُّهَا النَّاسُ كُلُوْا مِمَّا فِى الْاَرْضِ حَلٰلًا طَيِّبًا ۖ وَّلَا تَتَّبِعُوْا خُطُوٰتِ الشَّيْطٰنِ ۗ اِنَّهٗ لَكُمْ عَدُوٌّ مُّبِيْنٌ ﴿١٦٨﴾

Wahai manusia, makanlah sebagian (makanan) di bumi yang halal lagi baik dan janganlah mengikuti langkah-langkah setan. Sesungguhnya ia bagimu merupakan musuh yang nyata. (QS Al-Baqarah(1):168)

Makna kata *halal* dan *tayyib* yang terdapat dalam QS al-Baqarah(2):168. menekankan pentingnya konsumsi makanan yang *halal* dan *thayyib*. Secara bahasa

kata *thayyib* memiliki beberapa makna, pertama suci kedua bersih, ketiga sehat dan keempat menggugah seleraserta tidak membahayakan tubuh (Syarifah et al., 2024). makna lain dari *tayyib* menurut Ibnu Katsir adalah baik itu sendiri, tidak memiliki madharat bagi tubuh maupun akal. Allah SWT melalui QS al-Baqarah(2):168 ini memerintahkan manusia untuk mengonsumsi makanan yang tidak cukup dengan halalnya saja, akan tetapi harus bersih, bergizi dan tidak berdampak buruk bagi tubuh (*thayyib*) (Fitriani, 2022)

Manusia sebagai makhluk yang dianugerahi akal sehat (*ulul albab*), memiliki tanggung jawab besar untuk ikut mengambil peran dalam mewujudkan perintah Allah SWT agar mengonsumsi dan membedakan makanan yang bergizi dan tidak mengandung madharat (*tayyib*). Salah satu upaya yang bisa dilakukan adalah melalui analisis ilmiah terkait proses pembusukan berupa bahan pangan, pada penelitian ini berupa daging ikan yang diuji menggunakan teknologi modern seperti spektroskopi FTIR. Proses pembusukan daging ikan menyebabkan terjadinya perubahan kimiawi yang signifikan, seperti degradasi protein dan oksidasi lipid, yang berdampak pada penurunan mutu dan keamanan pangan. Identifikasi perubahan gugus fungsi yang menunjukkan penurunan kesegaran dilakukan dengan memanfaatkan teknologi Spektroskopi FTIR, sehingga konsumen dapat membedakan antara makanan yang masih bermutu dan segar *(thayyib)* dengan makanan yang telah mengalami pembusukan.

Hasil penelitian ini selaras dengan prinsip syariat bahwa makanan yang dikonsumsi harus memenuhi kriteria *halal* dan *thayyib*. Ikan lele sebagai bahan pangan termasuk makanan halal, namun mutunya dapat menurun seiring waktu. Dengan memahami perubahan kimiawi selama proses pembusukan, penelitian ini

mendukung upaya untuk memastikan bahwa hanya makanan dengan mutu baik dan bergizi yang dikonsumsi, sehingga masyarakat dapat menghindari bahaya kesehatan yang timbul akibat konsumsi produk yang sudah tidak layak makan.

QS. al-Baqarah (2):168 juga memperingatkan agar manusia tidak mengikuti langkah-langkah setan, yang salah satunya adalah mengabaikan kehati-hatian dalam memilih makanan. Konsumsi bahan pangan yang telah membusuk, tanpa memperhatikan kualitas dan keamanannya, termasuk perbuatan yang melalaikan prinsip kehati-hatian dalam syariat. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada bidang ilmu pengetahuan dan teknologi pangan, tetapi juga menjadi bagian dari implementasi nilai Islam dalam menjaga kesehatan, keselamatan, dan kesucian makanan yang dikonsumsi oleh umat (Syahputra et al., 2023).

Melakukan analisis terhadap bahan pangan, khususnya dalam memantau kualitas dan keamanan makanan, memiliki hubungan erat dengan upaya mewujudkan konsumsi makanan yang thayyib, yaitu makanan yang halal, baik, dan menyehatkan. Dengan mengonsumsi makanan yang sehat dan thayyib, kita tidak hanya memenuhi kebutuhan fisik, tetapi juga menjalankan salah satu tujuan utama dari syariat Islam, yaitu *hifzh al-nafs* (menjaga jiwa). Menjaga jiwa berarti memastikan gaya hidup yang sehat dan terhindar dari bahaya yang ditimbulkan oleh konsumsi makanan yang telah membusuk atau tercemar. Tubuh yang sehat akan mempengaruhi kualitas ibadah dan ketaatan seorang hamba kepada Allah, karena kesehatan adalah prasyarat untuk bisa menjalankan berbagai ibadah dengan sempurna. Oleh karena itu, aktivitas ilmiah seperti analisis bahan pangan, termasuk pengujian mutu ikan menggunakan spektroskopi FTIR, menjadi bentuk kontribusi

nyata dalam melaksanakan prinsip-prinsip syariat, yaitu menjaga jiwa demi kesempurnaan pengabdian kepada Allah.(Roslan et al., 2024).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disumpulkan bahwa :

1. Analisis perubahan gugus fungsi pada sampel ikan dilakukan selama 36 jam dengan interval pengujian setiap 12 jam. dari hasil pengujian spektroskopi FTIR dapat diidentifikasi bahwa seiring bertambahnya waktu penyimpanan (0, 12, 24 dan 36 jam) terjadi perubahan nyata pada intensitas atau absorbansi di setiap gugus fungsi utama seperti gugus C=O *Streching* (amida I) yang menunjukkan kandungan protein, C-O *Stretching* (karbohidrat), O-H *Streching* (kandungan air) dan C-H *Streching* (alkana) yang menunjukkan kandungan lipid. Pada sampel ke-0 jam, spektrum masih menunjukkan karakteristik mutu ikan masih segar dengan intensitas absorbansinya yang lebih stabil, sementara pada jam ke-12, 24 dan 36, perubahan absorbansi mulai mengindikasikan terjadinya degradasi protein, oksodasi lipid yang menimbulkan produk baru seperti aldehida dan keton serta kadar air yang semakin menurun yang menunjukkan sedang terjadinya penurunan mutu pada sampel ikan (proses pembusukan).
2. Spektroskopi FTIR yang dikombinasikan dengan analisis Principal Component Analysis (PCA) menunjukkan kemampuan dalam mebedakan sampel ikan berdasarkan tingkat kebusukan secara visual. Grafik yang dihasilkan seperti *Score plot* memperlihatkan pemisahan yang jelas antara sampel 0 jam dengan sampel 12, 24 dan 36 jam yang menandakan bahwa terjadi proses perubahan karakteristik kimiawi dengan jarak pergeseran yang

berbeda pada setiap sampel. PCA juga mampu mengelompokkan gugus fungsi utama yang berkontribusi terhadap proses pembusukan pada PC1 dan PC2 dengan nilai komulatif data sebesar 89,3%.

5.2 Saran

Penelitian kedepannya disarankan menggunakan interval waktu penyimpanan yang lebih pendek (kurang dari 12 jam) dan diberi berbagai perlakuan pada sampel agar diperoleh pemodelan yang lebih representatif terhadap kondisi nyata di lapangan dan dapat digunakan sebagai acuan dalam penanganan dan penyimpanan produk perikanan.

DAFTAR PUSTAKA

Aditya Hutama, A., Kurnia Hadiaty, R., & Hubert, N. (2016). *Biogeography Of Indonesian Freshwater Fishes: Current Progress*. *43*, 17–30. https://doi.org/10.14203/treubia.v43i0.2969ï

Artinah, M., & Hidayat Amrullah, S. (2023). *Ikan dalam Perspektif Islam dan Sains*.

Austin, B. (2006). The bacterial microflora of fish, revised. In *TheScientificWorldJournal* (Vol. 6, pp. 931–945). https://doi.org/10.1100/tsw.2006.181

Belvi Vatria, & Polnep, P. (2010). *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Rekayasa Edisi Januari*.

Bintang M. (2010). *Biokimia Teknik Penelitian* .

Che Man, Y. B., Rohman, A., & Mansor, T. S. T. (2011). Differentiation of lard from other edible fats and oils by means of Fourier transform infrared spectroscopy and chemometrics. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, *88*(2), 187–192. https://doi.org/10.1007/s11746-010-1659-x

Cheng, J. H., Dai, Q., Sun, D. W., Zeng, X. A., Liu, D., & Pu, H. Bin. (2013). Applications of non-destructive spectroscopic techniques for fish quality and safety evaluation and inspection. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 34, Issue 1, pp. 18–31). https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.005

Dewi, E. N., Kurniasih, R. A., & Purnamayati, L. (2019). gugus fungsi ikan. *JPHPI*, *22*, 45–46.

'Eskin, M. and 'Shahidi, F. (1990). *Biochemistry of Foods* (II). AcademicPress.

Fallah, A. A., Nematollahi, A., & Dehkordi, S. S. (2013). *Proximate composition and fatty acid profile of edible tissues of Capoeta damascina (Valenciennes, 1842) reared in freshwater and brackish water*. *32*(2), 150–154.

Fitriani, N. (2022). *Konsep Makanan Halalan Thayyiban Dalam Qs. Al-Baqarah : 168 Perspektif Quraish Shihab Dan Ilmu Kesehatan*.

Frida, D. (2022). *Pengaruh Penambahan Transglutaminase Terhadap Gugus Fungsi Dan Profil Asam Amino Gelatin Kulit Ikan Patin (Pangasius hypophthalmus)*.

Ghianovan, J. (2023). *Furgensi Infrastruktur Dalam Surat An-Nahl Ayat 15* (Vol. 3, Issue 1). http://jurnal.radenfatah.ac.id/index.php/jsq

Good, C., Davidson, J., Welsh, C., Snekvik, K., & Summerfelt, S. (2010). The effects of carbon dioxide on performance and histopathology of rainbow trout Oncorhynchus mykiss in water recirculation aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, *42*(2), 51–56. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.11.001

Hafiludin. (2015). Analisis Kandungan Gizi Pada Ikan Bandeng Yang Berasal Dari Habitat Yang Berbeda The Analysis Of Nutritional Content Of Milkfishes Which Come From Different Habitats. *Jurnal Kelautan*, *8(1)*. http://journal.trunojoyo.ac.id/jurnalkelautan

Harpida, R. (2019). *Keanekaragaman Spesies Ikan Di Sungai Lawe Meulang Sebagai Materi Pendukung Pembelajaran Kingdom Animalia Disman 1 Kluet Tengah Kabupatenaceh Selatan Skripsi Diajukan oleh*.

Hayati. (2007). *Dasar dasar analisis spektroskopi*.

Junianto. (2003). *Teknik penanganan ikan*. Penebar Swadaya.

Kerr, L. A., & Campana, S. E. (2013). Chemical Composition of Fish Hard Parts as a Natural Marker of Fish Stocks. In *Stock Identification Methods: Applications in Fishery Science: Second Edition* (pp. 205–234). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397003-9.00011-4

Khoir, R., Khairuddin, F., Fazil Mawla Lubis, M., & Rahmadhani Hasibuan, F. (2023). Pengaruh Kualitas Air Terhadap Produksi Ikan Lele Dumbo (Clarias gariepinus). *Pubmedia Jurnal Biologi*, *1*, 1–8. https://doi.org/10.47134/biology.v1i1.193

Kobayashi, K., Jackson, S. J., & Sam, M. P. (2019). Globalization, creative alliance and self-Orientalism: Negotiating Japanese identity within Asics global advertising production. *International Journal of Cultural Studies*, *22*(1), 157–174. https://doi.org/10.1177/1367877917733812

Kottelat, Maurice., & Whitten, Tony. (1996). *Freshwater fishes of western Indonesia and Sulawesi : additions and corrections*. [Periplus Editions?].

Kusumastuti, A. (2011). *Pengenalan Pola Gelombang Khas Dengan Interpolasi*.

Latif Sahubawa, & Ustadi. (2018). *Teknologi Pengawetan dan Pengolahan Hasil Perikanan*. UGM PRESS.

Leiwakabessy, J., Batmomolin, W., Silaban, B. Br., & Mailoa, M. N. (2024). Penurunan Mutu Ikan Segar Hasil Budidaya Keramba Jaring Apung Di Teluk Ambon Pada Suhu Kamar. *AGRITEKNO: Jurnal Teknologi Pertanian*, *13*(1), 102–109. https://doi.org/10.30598/jagritekno.2024.13.1.102

Lemae, & Lasmi, L. (2016). *Studi Pengaruh Kemunduran Mutu Terhadap Kandungan Gizi Ikan Betok (Anabas Testudineus) Dari Daerah Mandor*. *8*.

Lestari, S. (2020). *Pengaruh Kondisi Post Mortem Ikan Patin (Pangasius Djambal) dengan Kematian Menggelepar yang Disimpan pada Suhu Berbeda Terhadap Mutu Filletnya*.

Lintang, C., Wahyu Widodo, T., & Lelono, D. (2016). Rancang Bangun Electronic Nose untuk Mendeteksi Tingkat Kebusukan Ikan Air Tawar. *IJEIS*, *6*(2), 129–140.

Masengi, S., Sary, W., & Sipahutar, Y. H. (2021a). Influence of Death Way and Stage of Reduction of The Quality Fillets of Nile Tilapia (Oreochromis niloticus). *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, *24*(2), 284–291. https://doi.org/10.17844/jphpi.v24i2.32498

Masengi, S., Sary, W., & Sipahutar, Y. H. (2021b). Influence of Death Way and Stage of Reduction of The Quality Fillets of Nile Tilapia (Oreochromis niloticus). *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, *24*(2), 284–291. https://doi.org/10.17844/jphpi.v24i2.32498

Rahmi, S., Sirait, P., & Setiawan Panjaitan, E. (2020). *Jurnal Media Informatika Budidarma Optimasi Klasifikasi Bayesian Network Melalui Reduksi Attribute Menggunakan Metode Principal Component Analysis*. *4*. https://doi.org/10.30865/mib.v4i4.2370

Rhardjo, F., & Sjafei, D. (2011). *Iktiology*. CV. LUBUK AGUNG.

Rohman, A., Kuwat, Retno, S., Sismindari, Yuny, E., & Tridjoko. (2012). Fourier Transform Infrared Spectroscopy applied for rapid analysis of lard in palm oil. In *International Food Research Journal* (Vol. 19, Issue 3).

Roslan, M., Fakulti, M., Islam, P., & Sosial, S. (2024). *Hifz Al-Nafs Dalam Maqasid Syariah: Analisis Teoritikal Hifz Al-Nafs In Maqasid Syariah: A Theoritical Analysis*. http://devojs.usas.edu.my/altakamul/index.php/altakmulfiles

Saputri, M. A., Pratiwi, G., Shiyan, S., Arina, Y., & Trisakti, I. (2023). *Profil Spektra Ftir (Fourier Transfrom Infrared Spectrophotometry)Sari Ikan Gabus (Channa Striata) Denganvariasi Metode Ekstraksi*. *15*(2), 126. https://jurnal.stikes-aisyiyah-palembang.ac.id/index.php/Kep/article/view/

Saraiva, C., Vasconcelos, H., & de Almeida, J. M. M. M. (2017). A chemometrics approach applied to Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) for monitoring the spoilage of fresh salmon (Salmo salar) stored under modified atmospheres. *International Journal of Food Microbiology*, *241*, 331–339. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.038

Sari, N. W., Anjas W, & Fajri. (2018). Analisis Fitokimia Dan Gugus Fungsi Dari Ekstrak Etanol Pisang Goroho Merah (Musa Acuminate (L). *IJOBB*, *2*(1).

Silfiyana Rohman, A., & Nurbaiti, U. (2021). *ANALISIS KENYAMANAN SUHU RUANG Analysis Of Room Temperature Comfort*. *17*(1).

Silvana, A., Koniyo, Y., Nursinar, S., & Kasim, F. (2018). *Penanganan dan Pengolahan Hasil Perikanan* (D. Nuryanti & Fazrin, Eds.). CV. Athra Samudra.

Skjervold, O., Fjaera, S. O., Østby, B., & Einen, O. (2001). Live-chilling and crowding stress before slaughter ž / of Atlantic salmon Salmo salar. In *Aquaculture* (Vol. 192). www.elsevier.nlrlocateraqua-online

Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10777

Syafei, L. (2017a). Keanekaragaman Hayati dan Konservasi Ikan Air Tawar. In *Jurnal Penyuluhan Kelautan dan Perikanan Indonesia* (Vol. 11, Issue 1). Halaman.

Syafei, L. (2017b). Keanekaragaman Hayati dan Konservasi Ikan Air Tawar. In *Jurnal Penyuluhan Kelautan dan Perikanan Indonesia* (Vol. 11, Issue 1). Halaman.

Syahputra, A. E. A., Faizin, N., Safik, A., & Ma'ali, A. (2023). Mengkonsumsi Makanan Halal Perspektif Al-Qur'an: Telaah Semantik-Historis QS Al-Baqarah ayat 168. *AL QUDS : Jurnal Studi Alquran Dan Hadis*, *7*(1), 37. https://doi.org/10.29240/alquds.v7i1.5510

Syarifah, U., Holil, K., Resmisari, R. S., Rahmah, A., & Griana, T. P. (2024). *Al Quds The Concept of Thayyib in A Review of the Quran and Science: Consumer Selection Over Quality Food*. *8*(1), 2580–3190. https://doi.org/10.29240/alquds.v8i1.7841

Tatang Sopandi, & Wardah. (2014). *Mikrobiologi Pangan : Teori dan Praktik*.

Tazi, I. (2023). *Sensor modern daan aplikasinya*. litnus.

Tazi, I., Triyana, K., & Siswanto, D. (2016). A Novel Arduino Mega 2560 Microcontroller-Based Electronic Tongue For Dairy Product Classification. *AIPConferenceProceedings1755*.

Van De Voort, F. R., Sedman, J., & Russin, T. (2001). Lipid analysis by vibrational spectroscopy. In *Eur. J. Lipid Sci. Technol* (Vol. 103).

Wheaton, Warner, F., & Thomas, L. (1985). *Processing aquatic food products, Aquatic food products*. Wiley.

Wiley, J. (2001). *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies*.

Yudistira, R., Meha, A. I., Yulianto, S., & Prasetyo, J. (2018). *Perubahan Konversi Lahan Menggunakan NDVI, EVI, SAVI dan PCA pada Citra Landsat 8 (Studi Kasus : Kota Salatiga)*.

Yuvaraj, D., Bharathiraja, B., Rithika, J., Dhanasree, S., Ezhilarasi, V., Lavanya, A., & Praveenkumar, R. (2019). Production of biofuels from fish wastes: an overview. *Biofuels*, *10*(3), 301–307. https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1231951

LAMPIRAN

Nilai Panjang Gelombang dan Absorbansi pada Sampel 0 Jam

No.	Bilangan Gelombang (cm^{-})	Absorbansi	Gugus Fungsi
1	519.14	10.12	C-I Streching
2	975.53	62.13	C-H alkena
3	1093.9	35.32	C–O *Streching*
	1160.94	27.94	
	1236.53	35.32	
4	1300.7	46.87	CN (amida III)
5	1387.7	35.92	C-H *Metyl*
6	1459.01	34.92	C-H *Metylen*
7	1536.03	15.10	N-H(amida II)
8	1640.14	10.16	C=O(amida I)
9	1742.83	44.63	C=O (aldehid)
10	2852.42	54.56	C-H alkana
	2922.31	39.39	
	2955.11	61.08	
11	3007.88	73.85	C-H aromatik
12	3281.71	63.63	O–H

Nilai Panjang Gelombang dan Absorbansi pada Sampel 12 Jam

No.	Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Absorbansi	Gugus Fungsi
1	519.14	10.00	C-I Streching
2	982.65	58.68	C-H alkena
3	1081.07	42.21	C–O *Streching*
	1176.62	42.44	
	1243.66	42.21	
4	1307.84	47.05	CN (amida III)
5	1394.84	30.96	C-H *Metyl*
6	1466.15	45.72	C-H *Metylen*
7	1538.88	22.56	N-H(amida II)
8	1634.44	18.23	C=O(amida I)
9	1738.55	59.97	C=O (aldehid)
10	2851	56.70	C-H alkana
	2918.03	32.30	
	2956.53	60.62	
11	3010.73	74.87	C-H aromatik
12	3281.71	60.58	O–H

Nilai Panjang Gelombang dan Absorbansi Sampel 24 Jam

No.	Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Absorbansi	Gugus Fungsi
1	519.14	10.00	C-I Streching
2	975.53	65.88	C-H alkena
3	1093.9	41.70	C–O *Streching*
	1160.94	39.68	
	1236.53	41.70	
4	1300.7	52.67	CN (amida III)
5	1387.7	39.53	C-H *Metyl*
6	1459.01	44.47	C-H *Metylen*
7	1536.03	18.93	N-H(amida II)
8	1640.14	18.20	C=O(amida I)
9	1742.83	70.37	C=O (aldehid)
10	2852.42	50.26	C-H alkana
	2922.31	30.31	
	2955.11	62.01	
11	3007.88	75.05	C-H aromatik
12	3281.71	61.53	O–H

Nilai Panjang Gelombang dan Absorbansi Sampel 36 Jam

No.	Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Absorbansi	Gugus Fungsi
1	519.14	10.00	C-I Streching
2	975.53	46.33	C-H alkena
3	1093.9	41.94	C–O *Streching*
	1160.94	41.51	
	1236.53	41.94	
4	1300.7	46.52	CN (amida III)
5	1387.7	27.90	C-H *Metyl*
6	1459.01	41.15	C-H *Metylen*
7	1536.03	15.33	N-H(amida II)
8	1640.14	14.34	C=O(amida I)
9	1742.83	71.74	C=O (aldehid)
10	2852.42	41.64	C-H alkana
	2922.31	19.94	
	2955.11	55.51	
11	3007.88	69.35	C-H aromatik
12	3281.71	59.60	O–H