

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN HIPOTESIS PENELITIAN

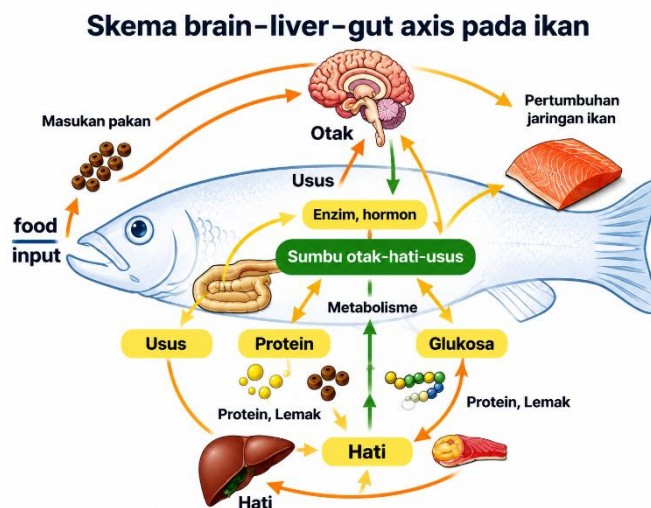
A. Kajian Pustaka

1. Fisiologi Hewan Aquatik

Fisiologi hewan akuatik mempelajari fungsi organ dan sistem biologis ikan secara terintegrasi dalam menjaga homeostasis, metabolisme, pertumbuhan, serta kemampuan adaptasi terhadap lingkungan (Blewett et al., 2022). Pertumbuhan dan kesehatan ikan sangat dipengaruhi oleh kemampuan fisiologis dalam mencerna, menyerap, dan mengasimilasi nutrisi pakan, sehingga pemahaman fisiologi pencernaan menjadi dasar dalam pengembangan strategi nutrisi pada budidaya ikan (Pang et al., 2024). Oleh karena itu, kajian fisiologi ikan menekankan mekanisme pencernaan dan metabolisme nutrisi utama, seperti protein, lemak, dan karbohidrat, yang berpengaruh terhadap efisiensi konversi pakan dan pembentukan biomassa (Bano et al., 2023).

Struktur dan fungsi sistem pencernaan ikan bervariasi antarspesies sesuai dengan adaptasi terhadap jenis pakan alami. Organ pencernaan utama dan organ aksesori bekerja secara terkoordinasi untuk menguraikan nutrisi kompleks menjadi senyawa sederhana yang dapat diserap tubuh, sehingga efisiensi pencernaan mencerminkan keterkaitan antara komposisi pakan dan respon fisiologis ikan (Nolasco-Soria et al., 2025). Selain itu, regulasi fisiologis ikan dipengaruhi oleh interaksi antara saluran

pencernaan, sistem saraf, dan organ metabolik yang dikenal sebagai *brain–liver–gut axis*. Melalui mekanisme ini, sinyal nutrisi dari pakan berperan dalam pengaturan metabolisme energi, pertumbuhan, dan keseimbangan hormon melalui jalur hormonal dan neural (De Cól et al., 2024). Keterkaitan antar organ tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1, yang menegaskan peran kualitas dan komposisi pakan dalam mengendalikan proses fisiologi ikan.



Gambar 2.1 Skema brain–liver–gut axis pada ikan dalam regulasi metabolisme nutrien.

Sumber: diadaptasi dari (Yuru et al., 2020)

Fisiologi pencernaan ikan juga dipengaruhi oleh mikrobiota usus yang berkontribusi terhadap efisiensi pencernaan dan metabolisme nutrisi melalui aktivitas enzim dan metabolit tertentu. Respon fisiologis ikan terhadap pakan selanjutnya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan budidaya, seperti suhu dan kualitas air, sehingga ketidaksesuaian pakan dengan kebutuhan fisiologis ikan dapat menurunkan efisiensi pakan dan kesehatan ikan (Hamed et al., 2024).

Perkembangan penelitian fisiologi ikan juga mengintegrasikan pendekatan nutrigenomik untuk memahami keterkaitan antara nutrisi pakan dan regulasi metabolisme serta pertumbuhan. Dengan demikian, pemahaman fisiologi pencernaan dan metabolisme ikan menjadi dasar penting dalam menilai relevansi kandungan gizi dan senyawa bioaktif pakan suplemen berbahan herbal (Iqbal et al., 2025).

2. Pakan Ikan dan Suplementasi Herbal dalam Nutrisi dan Fisiologi Ikan

Pakan ikan merupakan sumber nutrisi utama dalam budidaya akuakultur yang menyediakan berbagai zat gizi esensial, seperti protein, lipid, vitamin, dan mineral yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan, kesehatan, serta proses metabolisme ikan. Kesesuaian komposisi nutrisi dalam pakan dengan kebutuhan fisiologis ikan berpengaruh terhadap efisiensi pemanfaatan nutrisi dan performa budidaya, sehingga formulasi pakan yang seimbang menjadi faktor penting dalam mendukung produktivitas dan keberlanjutan akuakultur (Brum et al., 2025).

Perkembangan pakan ikan modern menunjukkan bahwa pakan tidak lagi berfungsi hanya sebagai penyedia nutrisi dasar, tetapi juga diformulasikan dengan berbagai aditif fungsional, seperti probiotik, prebiotik, enzim, imunostimulan, dan bahan herbal (*phytogenic additives*) untuk meningkatkan performa dan kesehatan ikan (Okon et al., 2025). Penggunaan bahan herbal dalam pakan dilaporkan mampu meningkatkan sistem imun, aktivitas antioksidan, kesehatan saluran pencernaan, efisiensi

pemanfaatan nutrien, serta ketahanan ikan terhadap berbagai stres lingkungan, sehingga berperan sebagai komponen penting dalam pengembangan pakan fungsional akuakultur (Banu et al., 2025).

Keterkaitan antara nutrisi pakan, respon fisiologis ikan, dan peran suplementasi herbal digambarkan pada Gambar 2.2. Diagram tersebut menunjukkan bahwa nutrien pakan berfungsi sebagai dasar pemenuhan kebutuhan metabolik, sementara suplementasi herbal berperan sebagai aditif fungsional yang memodulasi respon fisiologis melalui mekanisme imun dan antioksidan. Kombinasi keduanya berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi pakan dan kemampuan adaptasi ikan terhadap kondisi lingkungan budidaya.



*Gambar 2.2 Diagram Konsep Pakan Ikan dan Suplementasi Herbal dalam Nutrisi dan Fisiologi Ikan
(Sumber: disusun penulis berdasarkan (Onomu & Okuthe, 2024))*

Berdasarkan kajian pustaka dan diagram konseptual tersebut, pakan ikan dipahami tidak hanya sebagai sumber nutrien, tetapi juga sebagai

sarana modulasi fisiologis melalui suplementasi bahan herbal. Kerangka konseptual ini menjadi dasar teoritis dalam penelitian penyusunan e-modul fisiologi hewan berbasis kandungan gizi pakan suplemen ikan berbahan herbal.

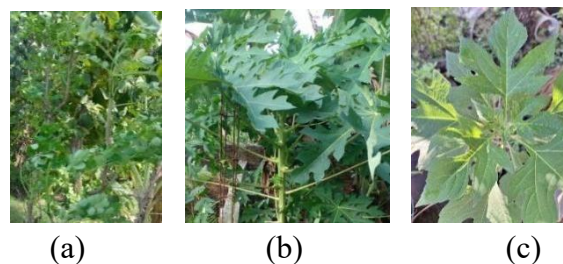
3. Potensi Daun Kelor (*Moringa oleifera*), Daun Pepaya (*Carica papaya L.*), dan Daun Kipahit (*Tithonia diversifolia*) sebagai Bahan Pakan Ikan

Budidaya ikan yang berkelanjutan membutuhkan formulasi pakan yang tidak hanya berfokus pada pemenuhan kebutuhan nutrisi dasar, tetapi juga mampu mendukung kesehatan dan fungsi fisiologis ikan secara menyeluruh. Pakan dengan kualitas nutrisi yang baik berperan penting dalam meningkatkan pertumbuhan, efisiensi pemanfaatan pakan, serta ketahanan ikan terhadap kondisi lingkungan dan penyakit. Oleh karena itu, penggunaan bahan tambahan pakan (*feed additive*) menjadi salah satu strategi yang banyak dikembangkan dalam sistem budidaya modern (Okon et al., 2025).

Pemanfaatan bahan herbal sebagai pakan suplemen merupakan alternatif yang potensial karena berasal dari sumber alami dan mengandung berbagai senyawa bioaktif yang mampu meningkatkan sistem imun, aktivitas antioksidan, kesehatan saluran pencernaan, serta efisiensi pemanfaatan nutrisi pada ikan. Oleh karena itu, bahan herbal berpotensi dikembangkan sebagai pakan fungsional yang lebih ramah lingkungan dibandingkan penggunaan bahan kimia sintetis dalam akuakultur (Banu et al., 2025).

Daun kelor (*Moringa oleifera*), daun pepaya (*Carica papaya L.*), dan daun kipahit (*Tithonia diversifolia*) merupakan bahan herbal yang tersedia secara lokal dan dilaporkan memiliki potensi sebagai bahan pakan suplemen ikan. Dalam penelitian ini, daun pepaya yang digunakan berasal dari varietas pepaya Thailand, yang dikenal luas dalam budidaya dan pemanfaatan pakan karena ketersediaannya yang tinggi serta karakteristik daunnya yang relatif seragam.

Ketiga bahan herbal tersebut memiliki karakteristik nutrisi dan kandungan senyawa bioaktif yang berbeda, seperti protein, serat, serta senyawa fitokimia, namun sama-sama berperan dalam mendukung proses fisiologis ikan. Perbedaan karakteristik tersebut justru berpotensi memberikan efek saling melengkapi ketika digunakan dalam formulasi pakan. Oleh karena itu, ketiga bahan ini relevan untuk dikaji sebagai kandidat bahan pakan fungsional dalam mendukung efisiensi pakan dan kondisi fisiologis ikan dalam sistem budidaya akuakultur. Gambar 3.1 menampilkan dokumentasi daun kelor, daun pepaya, dan daun kipahit yang digunakan sebagai objek kajian dalam penelitian ini.



Gambar 2.3 (a) Daun Kelor (*Moringa oleifera*), (b) Daun Pepaya (*Carica papaya L.*), dan (c) Daun Kipahit (*Tithonia diversifolia*)
(Sumber: dokumentasi penulis)

Potensi nutrisi dan senyawa bioaktif dari ketiga bahan herbal tersebut menunjukkan karakteristik yang berbeda namun saling melengkapi. Ringkasan potensi daun kelor, daun pepaya, dan daun kipahit sebagai bahan pakan ikan berdasarkan kajian literatur disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Ringkasan Potensi Daun Herbal sebagai Bahan Pakan Ikan

Bahan Herbal	Kandungan Nutrisi	Senyawa Fitokimia Dominan	Potensi Efek Fisiologis pada Ikan	Sumber
Daun kelor (<i>M. oleifera</i>)	Protein kasar tinggi (22,99–29,36%), kaya vitamin dan mineral	Flavonoid, polifenol, glukosinolat, alkaloid	Meningkatkan pertumbuhan, efisiensi pakan, respon imun, dan aktivitas antioksidan pada ikan budidaya	(Saleh <i>et al.</i> , 2025) (Kamble <i>et al.</i> , 2024)
Daun pepaya (<i>C. papaya</i> L.)	Protein kasar relatif tinggi, mengandung serat dan mineral	Fenolik, flavonoid, papain	Meningkatkan pencernaan protein, pertumbuhan, efisiensi pakan, dan kapasitas antioksidan	(Khalidah <i>et al.</i> , 2022) (Babalola <i>et al.</i> , 2024)
Daun kipahit (<i>T. diversifolia</i>)	Nutrien sedang, berpotensi sebagai bahan pakan alternatif	Flavonoid, tanin, saponin, terpenoid, alkaloid	Berpotensi sebagai antioksidan, imunomodulator, dan fitobiotik pada ikan	(Méndez-martínez <i>et al.</i> , 2025) (Almayda <i>et al.</i> , 2025)

Berdasarkan Tabel 2.1, terlihat bahwa daun kelor dan daun pepaya cenderung berperan sebagai sumber nutrisi nabati yang mendukung pertumbuhan ikan, sementara daun kipahit lebih menonjol dari sisi keragaman senyawa bioaktif. Perbedaan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa ketiga bahan herbal memiliki potensi yang saling melengkapi apabila dikombinasikan dalam formulasi pakan suplemen. Oleh karena itu, kajian lebih lanjut mengenai kandungan gizi dan senyawa

fitokimia dari ketiga bahan herbal ini menjadi dasar penting dalam pengembangan pakan fungsional berbahan alami untuk ikan budidaya.

4. Senyawa Fitokimia pada Bahan Herbal sebagai Dasar Pakan Suplemen Ikan

Senyawa fitokimia merupakan metabolit sekunder tumbuhan yang memiliki aktivitas biologis dan berperan dalam memodulasi respons fisiologis hewan yang mengkonsumsinya, termasuk ikan budidaya. Berbagai senyawa fitokimia seperti flavonoid, polifenol, terpenoid, alkaloid, saponin, dan tanin telah diidentifikasi pada bahan herbal yang berpotensi digunakan dalam pakan ikan, dengan aktivitas utama berupa antioksidan, imunomodulator, dan peningkatan efisiensi pemanfaatan nutrisi (Tastan & Salem, 2021).

Pada daun kelor, flavonoid dan polifenol dilaporkan berperan dalam meningkatkan respon imun nonspesifik, seperti aktivitas lisozim dan fagositosis, serta mendukung mekanisme antioksidan. Selain itu, kandungan glukosinolat berpotensi berperan dalam proses detoksifikasi dan adaptasi fisiologis ikan terhadap stres lingkungan (El-Kassas et al., 2022). Daun pepaya mengandung papain dan enzim proteolitik lainnya yang dapat meningkatkan pencernaan protein serta pemanfaatan nutrisi pada ikan. Selain itu, senyawa fitokimia seperti flavonoid, saponin, dan tanin dilaporkan dapat memengaruhi penyerapan nutrisi di saluran pencernaan, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan pada ikan (Khalidah et al., 2022). Daun kipahit (*Tithonia diversifolia*)

merupakan tanaman yang kaya akan metabolit sekunder seperti polyphenols, saponins, steroids, dan phytohaemagglutinin yang telah dilaporkan memiliki aktivitas antioksidan, antibakteri, serta antiinflamasi. Kandungan bioaktif tersebut menjadikan *T. diversifolia* berpotensi sebagai bahan pakan fungsional dalam sistem budidaya ikan (Méndez-martínez et al., 2025).

Senyawa fitokimia yang terkandung dalam ketiga bahan herbal tersebut berperan sebagai komponen fungsional dalam pakan suplemen ikan. Keberadaan senyawa tersebut tidak hanya mendukung aspek nutrisi, tetapi juga berkontribusi terhadap modulasi respon fisiologis ikan melalui mekanisme imun dan antioksidan

5. Kandungan Gizi Pakan dan Uji Proksimat

Analisis proksimat digunakan untuk menilai kualitas pakan ikan melalui pengukuran parameter protein kasar, lemak, karbohidrat, serat kasar, abu, dan kadar air. Parameter tersebut memberikan gambaran kemampuan pakan dalam memenuhi kebutuhan nutrisi ikan budidaya serta menjadi dasar penilaian keseimbangan nutrisi dan efisiensi pemanfaatan nutrisi dalam saluran pencernaan ikan. Melalui uji proksimat, kesesuaian pakan hasil formulasi dengan standar mutu dan kebutuhan nutrisi spesifik ikan dapat dievaluasi secara objektif (Janna et al., 2022).

Penggunaan bahan herbal dalam formulasi pakan, seperti daun kelor (*Moringa oleifera*) dan daun pepaya (*Carica papaya*), berpotensi meningkatkan kualitas nutrisi pakan karena kedua bahan tersebut

mengandung protein nabati serta berbagai senyawa bioaktif yang dapat mendukung pertumbuhan dan efisiensi pemanfaatan pakan pada ikan (Faisal et al., 2024; Handajani et al., 2025). Selain kandungan protein, serat kasar merupakan komponen penting yang memengaruhi pencernaan nutrisi sehingga perlu diperhatikan dalam formulasi pakan. Parameter proksimat lainnya, seperti kadar lemak, abu, dan air, juga digunakan untuk mengevaluasi kualitas nutrisi, kestabilan, dan daya simpan pakan yang berkaitan dengan performa pertumbuhan ikan (Talunga et al., 2025).

Hasil analisis proksimat pada pakan hasil formulasi menunjukkan bahwa penggunaan bahan alami sebagai bahan baku pakan dapat menghasilkan profil nutrisi yang sesuai dengan kebutuhan ikan, terutama pada kandungan protein, lemak, dan serat kasar. Analisis proksimat digunakan untuk mengevaluasi kualitas nutrisi pakan melalui pengukuran kadar air, abu, protein, lemak, dan serat kasar sehingga dapat diketahui kesesuaiannya dengan kebutuhan pertumbuhan ikan (Talunga et al., 2025). Analisis proksimat digunakan untuk mengevaluasi kualitas nutrisi pakan formulasi berdasarkan kandungan protein, lemak, dan komponen nutrisi lainnya, serta membandingkannya dengan standar kebutuhan nutrisi ikan sehingga dapat digunakan untuk menilai kelayakan bahan baku alternatif dan bahan herbal sebagai pakan fungsional (Yusup et al., 2024).

Penggunaan bahan herbal seperti daun kelor (*Moringa oleifera*) dalam formulasi pakan diketahui memiliki kandungan protein yang cukup tinggi serta berpotensi meningkatkan kualitas nutrisi pakan dan efisiensi

pemanfaatan nutrisi oleh ikan. Oleh karena itu, keberadaan data proksimat pada pakan berbahan daun kelor, daun pepaya Thailand, dan daun kipahit menjadi dasar ilmiah dalam perumusan pakan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan nutrisi dasar ikan, tetapi juga berpotensi mendukung kondisi fisiologis organisme budidaya secara lebih optimal (Yusup et al., 2024).

6. E-Modul Berbasis Penelitian dalam Pembelajaran Fisiologi Hewan

E-modul merupakan media pembelajaran berbasis digital yang dirancang untuk menyajikan materi secara interaktif dan mandiri, sehingga memungkinkan mahasiswa mengakses informasi dan kegiatan belajar secara fleksibel sesuai kebutuhan belajar mereka. Penggunaan e-modul mendukung kemandirian belajar karena materi dapat diakses kapan saja dan membantu mahasiswa mengelola proses belajar secara lebih mandiri (Holisoh et al., 2023). E-modul adalah media pembelajaran berbasis digital yang disusun secara terstruktur untuk menyajikan materi dalam bentuk teks, gambar, audio, serta video yang saling terintegrasi, sehingga dapat menunjang proses belajar yang lebih efektif dan interaktif. Berdasarkan evaluasi, e-modul memiliki tingkat usability, kualitas konten, dan efektivitas yang tinggi dalam mendukung pembelajaran mandiri mahasiswa (Utami et al., 2025).

Integrasi hasil penelitian ke dalam e-modul meningkatkan relevansi dan keterkaitan antara teori dan praktik, terutama dalam studi fisiologi hewan. Tumbuhan dari famili Lamiaceae sering dimanfaatkan sebagai aditif pakan dalam budidaya akuakultur karena memiliki kemampuan

dalam meningkatkan status antioksidan, respons imun, serta pertumbuhan pada ikan budidaya. Efek tersebut berhubungan dengan kandungan senyawa bioaktif seperti senyawa fenolik, alkaloid, terpenoid, dan flavonoid yang bekerja melalui mekanisme sebagai antioksidan, imunomodulator, serta pengatur metabolisme (Orso et al., 2022).

Pendekatan berbasis penelitian pada e-modul memberikan keunggulan berupa: 1) peningkatan pemahaman konsep dan literasi ilmiah melalui penyajian data penelitian yang relevan, di mana penggunaan e-modul interaktif berbasis konteks ilmiah dapat membantu mahasiswa memahami konsep pembelajaran melalui visualisasi yang terstruktur dan berbasis data (Putra et al., 2023); dan 2) pengembangan keterampilan berpikir kritis dalam menganalisis pengaruh nutrisi dan senyawa bioaktif terhadap fisiologi ikan, yang sejalan dengan temuan bahwa e-modul yang dikembangkan dengan pendekatan *problem-based learning* dapat mendukung kemampuan berpikir kritis mahasiswa (Sumarhadi & Supahar, 2025). Materi dapat disusun dalam bentuk studi kasus, grafik, diagram, dan tabel proksimat sehingga memudahkan mahasiswa untuk mengaitkan teori fisiologi hewan dengan data empiris.

Penggunaan e-modul berbasis penelitian mendukung pembelajaran mandiri (*self-directed learning*) karena memungkinkan mahasiswa mengakses materi secara fleksibel, mempelajari kembali materi sesuai kebutuhan, dan mengembangkan literasi digital dalam proses pembelajaran (Sanova et al., 2022). Integrasi keanekaragaman hayati

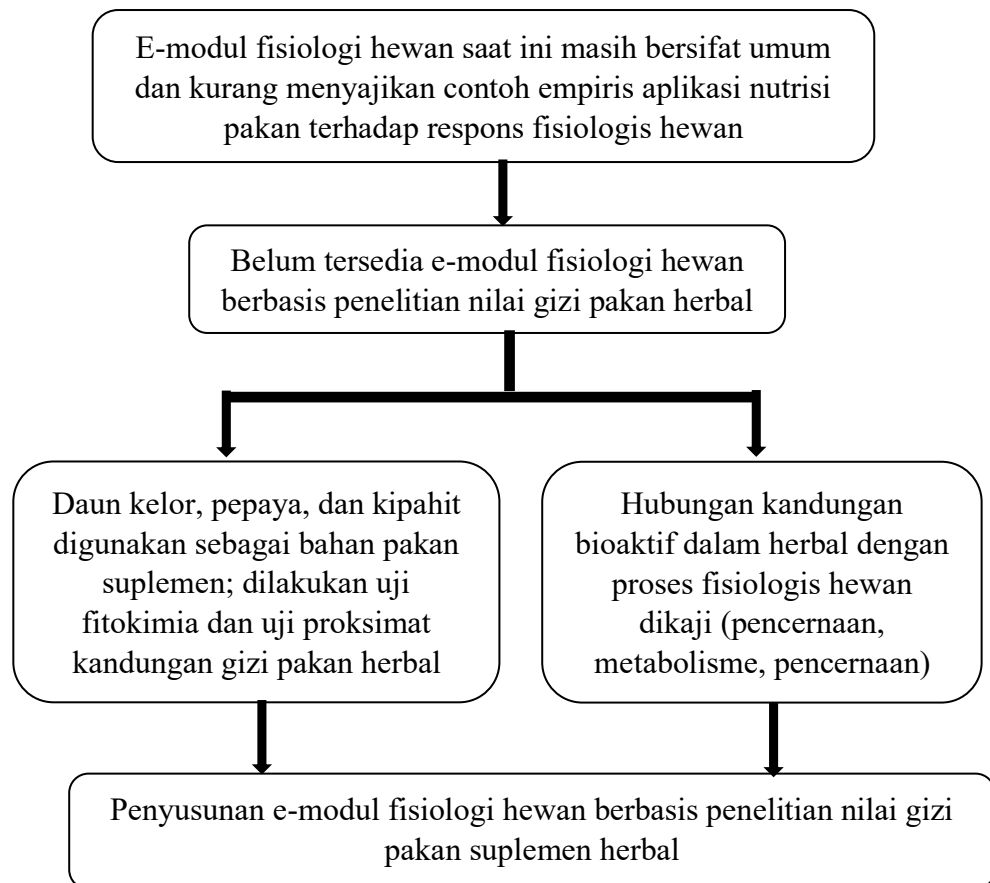
sebagai sumber belajar dalam media pembelajaran digital menunjukkan bahwa pemanfaatan potensi biodiversitas lokal dapat meningkatkan efektivitas proses pembelajaran biologi. Pendekatan ini memungkinkan mahasiswa memperoleh pengalaman belajar yang lebih kontekstual melalui eksplorasi materi berbasis fenomena nyata, sehingga pemahaman konsep menjadi lebih bermakna dan aplikatif. Penggunaan media digital yang interaktif juga berkontribusi dalam meningkatkan kemandirian belajar karena memberikan akses materi secara fleksibel serta mendorong pembelajaran mandiri berbasis eksplorasi ilmiah (Utami et al., 2023).

B. Kerangka Berpikir

Penelitian ini mengembangkan e-modul fisiologi hewan berbasis penelitian nilai gizi pakan suplemen herbal. Permasalahan utama adalah e-modul yang tersedia masih bersifat umum dan belum mengaitkan secara empiris antara nutrisi pakan dan respons fisiologis hewan, sehingga pembelajaran lebih dominan teoritis tanpa pemahaman aplikasi pada proses pencernaan, metabolisme, dan pertumbuhan. Untuk menjawab permasalahan tersebut, digunakan bahan herbal berupa daun kelor (*Moringa oleifera*), pepaya (*Carica papaya*), dan kipahit (*Tithonia diversifolia*) yang mengandung protein, enzim proteolitik, flavonoid, dan senyawa fenolik yang berperan dalam peningkatan digestibilitas, aktivitas enzim pencernaan, dan regulasi fisiologis.

Hasil analisis kandungan gizi dan fitokimia pakan herbal digunakan sebagai dasar penyusunan e-modul. Dengan demikian, e-modul yang

dihasilkan mengintegrasikan konsep nutrisi pakan, bioaktif herbal, dan respons fisiologis hewan secara kontekstual dalam pembelajaran fisiologi hewan. Berikut merupakan kerangka berpikir yang menggambarkan alur penelitian penyusunan e-modul berbasis penelitian kandungan gizi pakan suplemen ikan berbahan herbal.



Gambar 2.4 Bagan Kerangka Berpikir

C. Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kerangka berpikir, maka dapat dirumuskan hipotesis penelitian sebagai berikut:

1. E-modul fisiologi hewan yang disusun berdasarkan hasil penelitian kandungan gizi pakan suplemen ikan berbahan herbal layak digunakan sebagai sumber pembelajaran yang kontekstual dan berbasis data.
2. Serbuk daun kelor (*Moringa oleifera*), daun pepaya (*Carica papaya*), dan daun kipahit (*Tithonia diversifolia*) mengandung senyawa fitokimia yang berpotensi sebagai bahan baku pakan suplemen ikan.
3. Formulasi pakan berbahan kombinasi daun kelor (*Moringa oleifera*), daun pepaya (*Carica papaya*), dan daun kipahit (*Tithonia diversifolia*) memiliki kandungan gizi yang berpotensi mendukung kebutuhan nutrisi ikan