

BAB 2

TINJAUAN TEORITIS

2.1 Tinjauan Teoritis

2.1.1 Gaharu (*Aquilaria malaccensis*)

Indonesia adalah negara kepulauan dengan luas sekitar 9 juta km². Negara ini terletak di antara dua samudra dan dua benua, dengan jumlah pulau mencapai sekitar 17.500 pulau. Panjang garis pantainya mencapai sekitar 95.181 km. Kondisi geografis tersebut menjadikan Indonesia sebagai negara dengan keanekaragaman hayati yang luar biasa, meskipun luasnya hanya sekitar 1,3% dari luas Bumi. Keanekaragaman ini ditandai oleh banyaknya keunikan genetik, variasi genetik yang tinggi, serta keragaman spesies, ekosistem, dan spesies endemik. Keanekaragaman hayati Indonesia meliputi gen, spesies tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme, serta ekosistem dan proses ekologi (Lagundri et al., 2020). Luasan hutan Indonesia juga mencapai 138 juta hektar (Rachmawaty et al., 2021). Hutan merupakan suatu ekosistem terpadu yang terbentang di atas hamparan lahan luas. Ekosistem ini mengandung sumber daya hayati yang didominasi oleh pepohonan. Diantara beragam jenis pepohonan yang tumbuh di hutan, sekitar 5% di antaranya dimanfaatkan sebagai penghasil kayu. Sementara itu, sebagian besar jenis lainnya berpotensi menghasilkan Hasil Hutan Bukan Kayu (HHBK) (Lingsar et al., 2017).



Gambar 2. 1 Pohon *Aquilaria malaccensis*

(Sumber: (Za'amah Ulfah et al., 2021))

Salah satu hasil hutan bukan kayu adalah gaharu, yang memiliki nilai ekonomi lebih tinggi dibandingkan hasil hutan lainnya. Di Indonesia, terdapat sekitar 27 spesies (Hayani et al., 2024), dalam 7 (tujuh) genus pohon penghasil gaharu, Genus-genus tersebut meliputi *Wikstroemia*, *Dalbergia*, *Gonystylus*, *Aetoxylon*, *Girynops*, *Enkleia*, *Aquilaria*, dan *Exxocaria* (W. S. Pono, 2013). Menurut (Satradi et al., 2021) berikut data sebaran pohon penghasil gaharu dan daerah penyebarannya di Indonesia yang terdapat pada (Tabel 2.1) dibawah:

Tabel 2. 1 Spesies Pohon Penghasil Gaharu dan Sebarannya di Indonesia

No.	Nama Ilmiah	Family	Daerah Penyebaran
1.	<i>Aquilaria malaccensis</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sumatera, Kalimantan
2.	<i>Aquilaria hirta</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sumatera, Kalimantan
3.	<i>Aquilaria filaria</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Nusa Tenggara, Maluku dan Irian Jaya
4.	<i>Aquilaria microcarpa</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sumatera, Kalimantan
5.	<i>Aquilaria agalloca R</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sumatera, Jawa dan Kalimantan
6.	<i>Aquilaria beccariana</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sumatera, Kalimantan
7.	<i>Aquilaria secundana</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Maluku dan Irian Jaya
8.	<i>Aquilaria moszkowskii</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sumatera
9.	<i>Aquilaria tomentosa</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Irian Jaya
10.	<i>Aetoxylon sympethalum</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Kalimantan, Maluku dan Irian Jaya
11.	<i>Enkleia malaccensis</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Irian Jaya dan Maluku
12.	<i>Wikstroemia poliantha</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Nusa Tenggara dan Irian Jaya
13.	<i>Wikstroemia tenuriamis</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sumatera, Bangka dan Kalimantan
14.	<i>Wikstroemia androsaemofilia</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Kalimantan, NTT, Irian Jaya dan
15.	<i>Gonystylus bancanus</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sulawesi
16.	<i>Girynops macrophylus</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sumatera, Bangka dan Kalimantan
17.	<i>Girynops cumingiana</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Kalimantan dan Sumatera
18.	<i>Girynops rosbergii</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Nusa Tenggara dan Irian Jaya
19.	<i>Girynops verstegii</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Nusa Tenggara
20.	<i>Girynops moluccana</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	NTT dan NTB
21.	<i>Girynops decipens</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Maluku dan Halmahera
22.	<i>Girynops ledermanii</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sulawesi Tengah
23.	<i>Girynops salifolia</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Sulawesi Tengah
24.	<i>Girynops audate</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Irian Jaya

No.	Nama Ilmiah	Family	Daerah Penyebaran
25.	<i>Girynops podocarpus</i>	<i>Thymelaeaceae</i>	Irian Jaya
26.	<i>Dalbergia falviflora</i>	<i>Leguminosae</i>	Irian Jaya
27.	<i>Exocaria agaloccha</i>	<i>Euphorbiaceae</i>	Sumatera dan Kalimantan

Dari data **Tabel 2.1.** diatas menunjukkan bahwasannya *Aquilaria malaccensis* yang terdapat pada (**Gambar 2.1**) merupakan salah satu pohon penghasil gaharu, spesies ini termasuk ke dalam famili *Thymelaeaceae* (Munajim, 2025). Menurut (Rudiana et al., 2021) *Aquilaria malaccensis* termasuk komoditas kehutanan bernilai ekonomi tinggi. Saat ini *Aquilaria malaccensis* tumbuh secara alami di daerah Pulau Sumatera dan Kalimantan (Satradi et al., 2021). Selain di Indonesia spesies *Aquilaria malaccensis* juga tersebar di beberapa negara di dunia diantaranya termasuk Bangladesh, Bhutan, India, Indonesia, Iran, Laos, Malaysia, Myanmar, Filipina, Singapura, dan Thailand (Addini, 2025). Pembentukan daun serta cabang baru pada *Aquilaria malaccensis* terjadi pada masa pra-musim hujan, yaitu Maret hingga April, dan berlanjut hingga musim hujan utama pada Juli hingga Agustus. Tanaman ini berbunga pada awal musim hujan, yakni April hingga Juni, diikuti oleh pembuahan yang berlangsung pada bulan-bulan berikutnya hingga September. Fase reproduksi secara keseluruhan hanya berlangsung selama lima bulan, dari April hingga September, dan dipengaruhi oleh kondisi musim hujan. Perkembangan organ tanaman ini sangat dipengaruhi oleh suhu serta curah hujan (Kharnaier & Thomas, 2021). Spesies ini menghasilkan gaharu melalui proses pembentukan yang bersifat respons patologis terhadap infeksi mikroorganisme, khususnya jamur dari genus *Fusarium*, *Aspergillus*, dan *Penicillium*. Infeksi tersebut memicu produksi senyawa resin aromatik sebagai mekanisme pertahanan, yang kemudian terakumulasi di jaringan kayu dan membentuk gubal gaharu (Munajim, 2025).

Menurut Badan Standardisasi Nasional (BSN), berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 7631:2018 yang sebelumnya dikenal sebagai SNI 01-5009.1-1999, gaharu didefinisikan sebagai hasil hutan bukan kayu. Hasil ini berupa damar wangi atau resin aromatik yang terbentuk secara alami atau melalui induksi buatan pada pohon dari genus *Aquilaria* spp. serta genus lainnya dalam famili *Thymelaeaceae*. Dalam perdagangan internasional, gaharu dikenal dengan sebutan

agarwood, *aloewood*, atau *eaglewood* karena aromanya yang harum. Oleh sebab itu, gaharu termasuk komoditas mewah yang digunakan dalam berbagai industri, antara lain parfum, kosmetik, dupa, kemenyan, bahan baku obat-obatan, dan teh (Herawati et al., 2013).

Gubal gaharu, atau *aromatic resin*, berasal dari bagian pohon penghasil gaharu yang telah mati secara alami, sebagian disebabkan oleh proses infeksi, baik yang terjadi secara alami maupun buatan (W. S. Pono, 2013). Proses ini umumnya terjadi pada jenis pohon dari family *Thymelaeaceae*. Pembentukan gaharu secara alami terjadi ketika bagian tanaman yang terluka, atau terkena jamur nantinya luka tersebut menyebabkan jaringan kayu terbuka sehingga memungkinkan mikroorganisme masuk dan menginfeksi area yang terluka. Infeksi ini memicu respons pertahanan tanaman berupa produksi senyawa metabolit sekunder oleh sel-sel penghasil alkaloid. Senyawa tersebut dikenal sebagai fitoaleksin, yaitu resin berwarna coklat dengan aroma khas yang harum. Seiring waktu, resin ini terus dihasilkan dan menutupi bagian yang terluka. Apabila proses pembentukan gaharu berlangsung dalam jangka waktu lama, resin yang dihasilkan akan berwarna lebih gelap dan memiliki aroma yang semakin kuat (Gambar 2.2) (Piancita, Giga, Indriyanto, 2021). Namun proses pembentukan gaharu secara alami memerlukan waktu yang lama. Hal ini disebabkan oleh berbagai faktor pembatas, seperti spesifikasi jenis jamur yang menginfeksi pohon untuk menghasilkan gaharu (Piancita, Giga, Indriyanto, 2021).

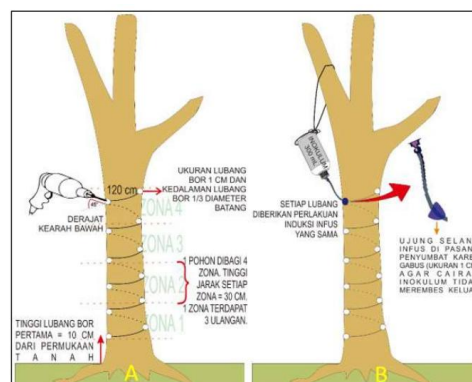


Gambar 2. 2 Gaharu yang Terbentuk secara Alami

(Sumber: pertanianku.com)

Oleh karena itu, dilakukan upaya untuk memproduksi resin gaharu secara buatan. Hal ini dilakukan melalui inokulasi, yaitu penularan patogen ke tanaman

gaharu (Kusumaningsih et al., 2022). Penyuntikan, atau inokulasi, yang dimaksud di sini adalah proses memasukkan bibit gubal gaharu ke dalam pohon untuk merangsang pembentukan gubal gaharu. Bibit tersebut dapat berupa jamur, bakteri, atau mikroorganisme lain yang, dikembangkan pada medium khusus. Untuk memastikan keberhasilan penyuntikan, pemilihan pohon yang sesuai sangat diperlukan. Pohon yang cocok untuk disuntik harus usia sekitar 5 hingga 8 tahun, lingkungan sekitar pohon cukup teduh untuk menjaga kelembaban tanah dan udara, bibit gubal gaharu bebas dari kontaminasi jamur lain., dan jamur bibit telah tumbuh secara optimal dan memenuhi semua persyaratan media inokulum (W. S. Pono, 2013). Lubang pengeboran dibuat dengan kedalaman maksimal sebesar $\frac{1}{3}$ diameter batang atau 3 cm. Posisi mata bor dimiringkan sekitar 45 derajat ke arah bawah. Titik pengeboran pertama, yang terletak paling bawah, dibuat pada jarak 10 cm dari permukaan tanah. Jarak vertikal antara baris lubang tingkatan pertama dan tingkatan kedua di atasnya adalah 10 cm. Sementara itu, jarak horizontal antar lubang disesuaikan dengan lebar pohon. Rancangan penginfusan pada satu pohon dibagi menjadi empat zona. Setiap zona memiliki tinggi 30 cm, sehingga total tinggi batang pohon yang menjadi lokasi semua perlakuan mencapai 120 cm (Rachmawaty et al., 2021). Ilustrasi proses pengeboran batang serta penginfusan dapat dilihat pada Gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2. 3 (A) Ilustrasi pola pengeboran berbentuk spiral, (B) rancangan sistem penginfusan pada batang *Aquilaria malaccensis*.

(Sumber: (Rachmawaty et al., 2021))

2.1.2 Morfologi *Aquilaria malaccensis*

Morfologi pohon *Aquilaria malaccensis* adalah sebagai berikut:

2.1.2.1 Batang

Pohon ini dapat tumbuh hingga mencapai tinggi sekitar 40 meter dengan diameter batang berkisar antara 40 hingga 60 cm. Permukaan batangnya bergaris halus, licin, dan berwarna coklat keputihan dengan tekstur kayu yang keras seperti pada (Gambar 2.4). (Iqbal, 2023).

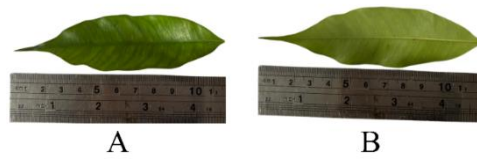


Gambar 2. 4 Batang *Aquilaria malaccensis*.

(Sumber: (Iqbal, 2023))

2.1.2.2 Daun

Tanaman gaharu (*Aquilaria malaccensis* Lam.) memiliki ciri khas berupa daun kering berwarna abu-abu kehijauan, sedikit bergelombang, dengan ukuran panjang sekitar 4–6 cm dan lebar 3–4 cm. Daun kering tersebut umumnya menggulung secara tidak beraturan. Serbuk simplisia dari daun gaharu berwarna hijau kekuningan, tidak berbau, dan memiliki bentuk serbuk kasar serta berbulu halus. Pada gambar 2.5 dibawah ini merupakan daun *Aquilaria malaccensis* tampak depan dan tampak belakang, memiliki bentuk lonjong memanjang dengan ujung meruncing, berukuran panjang sekitar 5–8 cm dan lebar 3–4 cm. Tulang daunnya tersusun menyirip dengan jumlah 12–16 pasang, berwarna hijau mengilap, memiliki aroma khas, serta memberikan rasa pahit yang diikuti oleh rasa manis (Za'amah Ulfah et al., 2021).



Gambar 2. 5 Daun *Aquilaria malaccensis* (A) Daun Tampak Depan, (B) Daun Tampak Belakang.

(sumber: Dokumentasi Peneliti)

2.1.2.3 Bunga



Gambar 2. 6 Morfologi Bungan *Aquilaria malaccensis*, (A) Bunga tampak depan, (B) Penampang memanjang bunga menunjukkan posisi ovarium dan benang sari, (C) Bunga tampak samping, (D) Susunan benang sari yang mengelilingi putik, (E) Penampang memanjang bunga menunjukkan ovarium pada bagian dasar bunga, dan (F) Putik tampak dari bagian bawah. Keterangan: St = stamen (benang sari), O = ovarium (bakal buah), dan Pt = putik. Skala bar = 1 mm.

(Sumber: (Venugopal & Marbaniang, 2015))

Bunga *Aquilaria malaccensis* berukuran kecil dengan diameter sekitar 8–10 mm, berwarna hijau kekuningan, dan tersusun berkelompok pada ketiak daun. Bunga ini bersifat biseksual serta tidak memiliki braktea. Karakter bunga berwarna hijau kekuningan dan tersusun dalam perbungaan aksilar juga dilaporkan sebagai ciri khas genus *Aquilaria* (Soehartono & Newton, 2001; Sarmah et al., 2022). Morfologi bunga dapat diamati dari berbagai sudut pengamatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.6. Pada tampak depan (Gambar 2.6A dan D), terlihat benang sari (*stamen*) berwarna kuning yang tersusun mengelilingi putik pada bagian tengah bunga. Bunga memiliki 5–7 sepal yang menyatu (*gamosepalus*),

bersifat menetap, dan permukaannya ditutupi rambut halus (*pubesen*). Petal berjumlah 10–11 helai, terpisah satu sama lain, berukuran lebih kecil dibandingkan sepal, serta memiliki banyak rambut halus menyerupai sisik. Bagian androesium terdiri atas 10–11 benang sari yang menempel pada petal (*epipetalus*). Kepala sari (*antera*) bertipe dorsifiks dan terletak di bawah bakal buah (*hipogin*). Penampang memanjang bunga (Gambar 2.6B dan E) menunjukkan ovarium superior berbentuk obovoid yang terletak pada bagian dasar bunga. Ovarium berdaging tebal, ditutupi rambut halus yang rapat, serta tersusun atas dua ruang (*bilokular*) yang masing-masing mengandung satu bakal biji (*ovulum*) dengan dua integumen (*bitegmis*). Tangkai putik (*stilus*) berukuran kurang dari 3 mm, sedangkan stigma berbentuk kepala (*kapitat*) dan bersifat basah.

Pengamatan bunga dari arah samping (Gambar 2.6C) memperlihatkan susunan sepal yang membungkus organ reproduksi bunga. Sementara itu, pengamatan dari bagian bawah bunga (Gambar 2.6F) menunjukkan posisi putik pada bagian pusat bunga. Pada fase bunga dewasa, stigma mengalami perubahan warna menjadi kecokelatan dan jumlah stamen, sepal, serta petal dapat meningkat hingga dua kali lipat dibandingkan bunga normal. Selain itu, bagian ginoseum tampak tertutup oleh rambut yang lebih lebat. Bunga ini bersifat biseksual, tidak memiliki braktea, serta berdiameter sekitar 8–10 mm. Pada bunga normal (Gambar 2.6 (A)), terdapat 5–7 sepal yang menyatu (*gamosepalus*), berukuran lebih besar daripada petal, bersifat menetap, menyerupai kelopak, dan berambut halus (*pubesen*). Petal berjumlah 10–11 helai, terpisah satu sama lain, sangat berambut halus, dan berbentuk seperti sisik kecil. Bagian androesium terdiri atas 10–11 stamen yang menempel pada petal (*epipetalus*), sebagaimana terlihat pada Gambar 2.6 (A). Kepala sari (*antera*) menempel di bagian punggung (*dorsifiks*) dan terletak di bawah bakal buah (*hipogin*). Pistil berjumlah satu, dengan ovarium superior berbentuk obovoid, berdaging tebal, serta ditutupi rambut halus yang padat (Gambar 2.6 (A)). Ovarium memiliki dua ruang (*bilokular*), masing-masing berisi satu bakal biji (*ovulum*) dengan dua integumen (*bitegmis*). Panjang tangkai putik (*stilus*) kurang dari 3 mm, sedangkan stigma berbentuk kepala (*kapitat*) dan bersifat basah. Pada bunga dewasa (Gambar 2.6 (B–D)), stigma berubah menjadi kecokelatan dan

jumlah stamen, sepal, serta petal meningkat menjadi dua kali lipat dibandingkan bunga normal. Selain itu, ginoseum pada Gambar 2.6 B dan D tampak tertutup oleh rambut lebat (Venugopal & Marbaniang, 2015).

2.1.2.4 Buah dan Biji



Gambar 2. 7 Buah dan Biji *Aquilaria malaccensis*

(Sumber: National Parks Boards (NParks))

Buahnya berbentuk bulat telur atau lonjong dengan ukuran panjang sekitar 4 cm dan lebar 2,5 cm seperti pada Gambar 2.7. Biji buah tersebut tertutup oleh rambut berwarna merah (Iqbal, 2023).

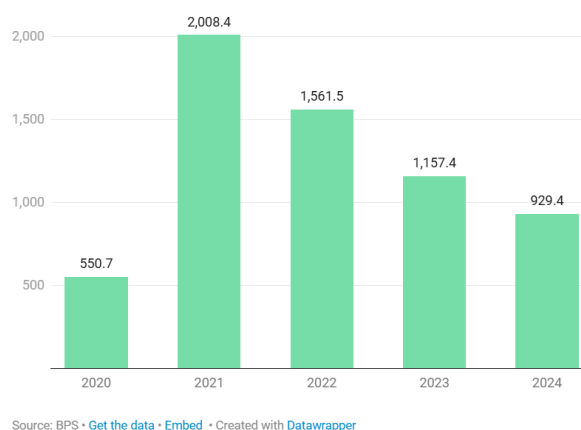
2.1.3 Klasifikasi *Aquilaria malaccensis*

Klasifikasi Gaharu (*Aquilaria malaccensis*) berdasarkan *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) <https://www.gbif.org/species/5524063>, adalah sebagai berikut:

<i>Kingdom</i>	: Plantae
<i>Phylum</i>	: Tracheophyta
<i>Class</i>	: Magnoliopsida
<i>Order</i>	: Malvales
<i>Family</i>	: Thymelaeaceae
<i>Genus</i>	: <i>Aquilaria</i> Lam.
<i>Species</i>	: <i>Aquilaria malaccensis</i> Lam.

2.1.4 Nilai Ekspor Gaharu Ke Luar Negeri

Kayu gaharu atau *agarwood* merupakan salah satu komoditas kayu bernilai ekonomi tinggi di dunia. Nilai istimewanya berasal dari aroma khas yang dihasilkan oleh resin aromatik yang terbentuk sebagai respons pertahanan pohon *Aquilaria* terhadap luka atau infeksi, terutama oleh jamur. Resin tersebut menghasilkan aroma khas yang dikenal sebagai *oud*, yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan utama dalam industri parfum dan produk wewangian premium (Kamarubahrin, 2025). Pasar gaharu Indonesia di tingkat dunia memiliki posisi yang sangat strategis. Hal tersebut didukung oleh keberadaan variasi spesies tumbuhan gaharu yang banyak di temukan dan tersebar di berbagai pulau yang ada di Indonesia, terkhusus Kalimantan dan Sumatera (Septiningrum et al., 2015). Potensi tersebut menjadikan Indonesia sebagai eksportir gaharu terbesar di dunia, dengan kontribusi sekitar 70% terhadap pemenuhan kebutuhan pasar internasional. Harga gaharu yang berkualitas tinggi dipasar lokal mencapai 53 juta/kg sedangkan di pasar internasional mencapai harga 133 juta/kg (Anddini, 2025). Berikut grafik volume ekspor gaharu di Indonesia pada tahun 2020 s.d. 2024 menurut Badan Pusat Statistik (BPS)



Gambar 2. 8 Grafik Volume Ekspor Gaharu di Indonesia pada Tahun 2020 s.d. 2024 menurut Badan Pusat Statistik (BPS)

Berdasarkan Gambar 2.8 diatas memperlihatkan bahwa permintaan gaharu secara global sangat tinggi terutama pada tahun 2021. Melansir data Badan Pusat Statistik (BPS) volume ekspor gaharu menunjukkan penurunan secara konsisten selama periode 2022 hingga 2024 setelah sebelumnya mengalami peningkatan signifikan pada tahun 2021. Pada tahun tersebut, volume ekspor gaharu tercatat

mencapai 2.008,4 ton, namun selanjutnya mengalami penurunan bertahap hingga hanya mencapai 929,4 ton pada tahun 2024 (Anddini, 2025). Dalam beberapa tahun terakhir, Arab Saudi tercatat sebagai negara tujuan ekspor utama gaharu Indonesia, diikuti oleh Uni Emirat Arab dan Korea Selatan. Menurut Setiawati (2025) pada tahun 2024, Saudi Arabia menjadi negara tujuan ekspor utama gaharu Indonesia dengan kontribusi terbesar dibandingkan negara tujuan lainnya. Nilai ekspor ke Saudi Arabia tercatat sebesar US\$8,5 juta (dalam rupiah 153 miliar) atau sekitar 66,37% dari total nilai ekspor komoditas tersebut. Selain Saudi Arabia, negara tujuan ekspor utama lainnya meliputi United Arab Emirates, South Korea, Singapore, dan Qatar. Selain itu, negara seperti Singapura dan Kuwait juga berkontribusi sebagai pasar ekspor potensial, meskipun nilai dan volume perdagangannya relatif lebih rendah. Data ini menunjukkan bahwa pasar Timur Tengah masih menjadi tujuan utama perdagangan gaharu Indonesia karena tingginya permintaan terhadap bahan baku parfum, dupa, dan kebutuhan religius lainnya.

2.1.5 Kultur *In Vitro*

Kultur *in vitro* atau lebih dikenal sebagai kultur jaringan tanaman, merupakan suatu teknik mengisolasi bagian tanaman seperti protoplas, sel, jaringan, serta organ. Bagian-bagian tersebut kemudian ditumbuhkan dalam suatu media buatan dengan kondisi aseptik dan terkontrol (Basri, 2016). Kultur *in vitro* merupakan metode yang digunakan untuk memperbanyak tanaman secara cepat dan efisien. Teknik ini memanfaatkan media kultur, seperti agar atau gel agar, yang di dalamnya terkandung nutrisi penting bagi pertumbuhan tanaman (Ashar, J. R., Farhanah, A., Hamzah, P., Ismayanti, R., Tuhuteru, S., Yusuf, R., Yulianti, R., 2023).

Prinsip utama kultur jaringan tanaman didasarkan pada teori totipotensi. Teori ini menjelaskan bahwa sel atau jaringan tanaman memiliki kemampuan untuk berkembang menjadi individu utuh apabila diberikan kondisi yang sesuai. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Gottlieb Haberlandt pada tahun 1902. Ia menyatakan bahwa setiap sel tanaman, meskipun berasal dari bagian yang kecil, memiliki potensi untuk menghasilkan tanaman baru.

Menurut (Pierik, 1987), Tumbuhan terdiri dari berbagai organ yang masing-masing tersusun dari jaringan berbeda, yang pada gilirannya terdiri dari sel-sel individual. Jika dinding sel sel-sel tersebut dicerna secara enzimatis, maka akan dihasilkan protoplas. Sama seperti terdapat berbagai bahan penyusun dalam tumbuhan, terdapat pula berbagai jenis kultur *in vitro*, yaitu:

1. Kultur tanaman utuh

Kultur tanaman utuh merupakan proses dikulturkannya bagian tanaman yang utuh seperti biji sehingga nantinya dalam proses pengkulturannya akan mirip dengan persemaian biji.

2. Kultur embrio

Kultur embrio adalah proses mengisolasi embrio dari bagian lain biji, kemudian menumbuhkannya dalam medium yang telah disiapkan. Dalam kultur ini, medium berfungsi sebagai pengganti endosperm biji dengan menyediakan nutrisi, vitamin, hormon, serta mineral yang diperlukan untuk perkembangan embrio selanjutnya.

3. Kultur organ

Organ yang diisolasi ditumbuhkan secara *in vitro*. Terdapat berbagai jenis kultur organ, seperti kultur meristem, kultur ujung tunas, kultur akar, kultur anter, dan lain-lain. Bagian atau jaringan yang diisolasi dari tanaman disebut eksplan, dan proses penumbuhannya disebut kultur eksplan.

4. Kultur kalus

Kultur kalus terjadi ketika jaringan yang diisolasi berasal dari jaringan terdiferensiasi, seperti jaringan penyusun daun atau batang. Dengan manipulasi medium yang tepat, jaringan tersebut dapat mengalami dediferensiasi, yaitu proses kebalikan dari diferensiasi, secara *in vitro*. Proses ini menghasilkan sekumpulan sel yang bersifat embrionik (meristematik) dan tidak terorganisasi. Sekumpulan sel ini disebut kalus, dan kultur yang dihasilkan dinamakan kultur kalus. Berbeda dengan kalus, terdapat semi kalus atau *protocorm like bodies* (PLB), yang sering disebut *protocorm*. PLB merupakan tahap perkembangan lanjutan dari kalus, di mana jaringan pada bagian permukaannya sudah mengalami diferensiasi, sedangkan

bagian dalamnya masih belum terdiferensiasi. Bagian dalam tersebut berpotensi berkembang menjadi calon daun, calon tunas, atau calon embrio.

5. Kultur sel tunggal

Pertumbuhan sel tunggal yang diperoleh dari jaringan, kalus, atau kultur suspensi dengan bantuan enzim atau secara mekanis.

6. Kultur protoplas

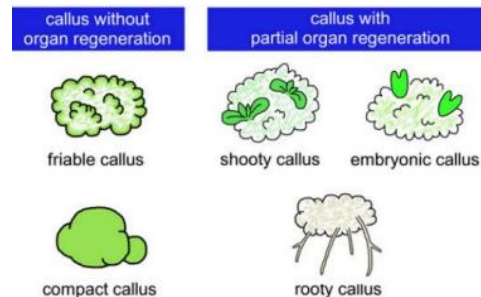
Kultur protoplas yang diperoleh dari sel dengan cara mencerna dinding sel secara enzimatis.

2.1.6 Induksi Kalus

Induksi kalus merupakan tahap awal dari teknik kultur *in vitro* yang bertujuan untuk menghasilkan dan memperbanyak sel kalus secara massal. Kalus merupakan sumber bahan tanam yang sangat penting dalam meregenerasi tanaman karena setiap sel tanaman memiliki kemampuan membentuk individu baru (Rasud & Bustaman, 2021). Tanaman menghasilkan massa sel yang tidak terstruktur, seperti kalus atau tumor, sebagai *respons* terhadap berbagai bentuk tekanan, misalnya cedera fisik atau infeksi patogen (Ikeuchi et al., 2013). Istilah kalus berasal dari bahasa latin yaitu “*Callum*” yang berarti keras, pada masa awal perkembangan tumbuhan, istilah kalus merujuk pada pertumbuhan sel yang masif serta akumulasi kalosa akibat luka pada jaringan. Kalus dapat berkembang dari satu sel yang berdiferensiasi, serta sebagian besar sel kalus bersifat totipoten atau mampu beregenerasi menjadi seluruh bagian tanaman (Steward et al., 1958).

Pembentukan kalus beberapa diduga melibatkan proses dediferensiasi sel atau proses pembalikan pertumbuhan sel. Namun demikian, kalus dapat dikategorikan ke dalam beberapa sub kategori dikarenakan kalus memiliki keragaman yang tinggi berdasarkan karakteristik mikroskopisnya. Sebagai contoh (Gambar 2.9) merupakan Ilustrasi Skema Jenis Kalus Tanaman yang dikategorikan sebagai kalus rapuh (*friable callus*) dan kalus kompak (*compact callus*), dikarenakan kalus tersebut tidak menunjukkan adanya regenerasi organ. Sedangkan kalus yang menunjukkan kemampuan melakukan regenerasi organ pada tingkat

tertentu disebut sebagai kalus akar, kalus tunas, atau kalus embrionik, tergantung pada jenis organ yang dihasilkannya (Zimmerman, 1993).

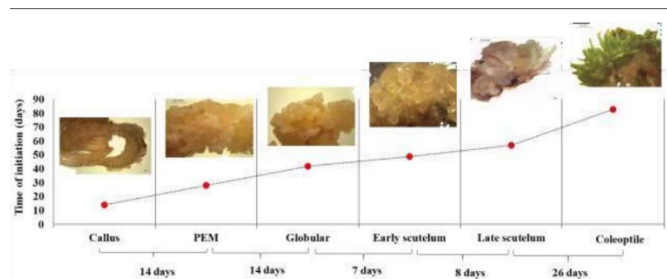


Gambar 2. 9 Ilustrasi Skema Jenis Kalus Tanaman.

(sumber: (Ikeuchi et al., 2013))

Menurut (Yelnitis & Komar, 2010), kultur kalus melibatkan tiga tahapan utama. Tahap pertama adalah induksi, di mana eksplan mengalami dediferensiasi dan pembelahan sel mulai terjadi. Tahap kedua adalah proliferasi, yang ditandai oleh pembelahan sel yang cepat. Tahap terakhir adalah diferensiasi, di mana proses metabolisme atau organogenesis berlangsung.

Pertumbuhan kalus dibagi menjadi lima fase. Fase pertama adalah fase lag, di mana sel bersiap untuk membelah. Fase kedua adalah fase eksponensial, dengan pembelahan sel yang cepat. Fase ketiga adalah fase linear, di mana pembelahan sel melambat dan ukuran sel membesar. Fase keempat menunjukkan penurunan pertumbuhan, sedangkan fase kelima adalah fase stasioner, di mana pertumbuhan konstan atau berhenti. Gambar 2.10 mengilustrasikan fase-fase pertumbuhan kalus tersebut.



Gambar 2. 10 Fase Pertumbuhan Kalus.

(Sumber: (Dewanti et al., 2021))

Berdasarkan Gambar 2.10 tersebut, proses perkembangan kalus menunjukkan tahapan embriogenesis somatik, yaitu proses pembentukan embrio dari sel somatik secara *in vitro* melalui serangkaian tahap perkembangan yang berlangsung secara bertahap dan terorganisir. Tahap awal dimulai dari terbentuknya kalus, yaitu massa sel yang belum terdiferensiasi dan masih aktif membelah sebagai respons terhadap induksi zat pengatur tumbuh. Pembentukan kalus merupakan tahap penting dalam kultur jaringan karena menunjukkan kemampuan sel untuk mengalami dediferensiasi dan kembali bersifat totipoten, sehingga berpotensi berkembang menjadi jaringan baru (Sivanesan et al., 2022; Fehér, 2023). Kalus yang terbentuk kemudian berkembang menjadi *Pro-Embryogenic Mass* (PEM), yaitu kumpulan sel embrionik yang memiliki kompetensi tinggi untuk memasuki jalur embriogenesis somatik. Pada tahap ini, sel-sel umumnya berukuran kecil, aktif membelah, serta memiliki kepadatan sitoplasma yang tinggi, yang menandakan karakter kalus embriogenik (Long et al., 2022; Martínez & Corredoira, 2024).

Selanjutnya, PEM mengalami diferensiasi menuju fase globular, yang ditandai dengan bentuk embrio menyerupai bola sebagai tahap awal pembentukan struktur embrio. Fase ini menandakan bahwa sel telah berhasil memasuki jalur perkembangan embriogenik dan mulai menunjukkan pola organisasi sel yang terarah. Setelah fase globular, embrio berkembang menuju tahap *early scutellum* dan *late scutellum*, yang menunjukkan terjadinya polarisasi embrio serta pembentukan struktur organ embrional yang semakin jelas. Pada fase ini, aktivitas metabolisme, pembelahan sel, dan diferensiasi jaringan berlangsung lebih intensif sehingga membutuhkan waktu perkembangan yang lebih panjang (Ramakrishnan et al., 2023).

Tahap akhir ditunjukkan dengan terbentuknya *coleoptile*, yaitu struktur pelindung tunas muda yang menandakan bahwa embrio telah berkembang menuju calon tanaman lengkap (*plantlet*). Menurut Martínez & Corredoira, (2024), keberhasilan perkembangan hingga tahap maturasi embrio sangat dipengaruhi oleh kualitas kalus embriogenik pada tahap awal, terutama kalus yang memiliki warna cerah (putih hingga putih kekuningan) dan tekstur remah atau kompak tertentu, karena karakter morfologi tersebut berkaitan erat dengan tingkat viabilitas dan

kompetensi embriogenik sel. Dengan demikian, morfologi kalus menjadi indikator penting dalam menentukan potensi regenerasi tanaman melalui jalur embriogenesis somatik (Dewanti, 2023).

2.1.7 Zat Pengatur Tumbuh

Zat Pengatur Tumbuh merupakan komponen yang memegang peranan penting dalam proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Zat pengatur tumbuh sering disebut juga sebagai hormon tumbuhan, senyawa ini merupakan senyawa organik bukan unsur hara, yang dalam jumlah sedikit zat pengatur tumbuh (hormon) mampu memacu, menghambat, maupun mengubah berbagai proses fisiologis pada tumbuhan (Ernita et al., 2023). Menurut (Yusdian et al., 2024) dalam kultur *in vitro* zat pengatur tumbuh merupakan salah satu suplemen yang ditambahkan ke dalam media kultur *in vitro* berfungsi untuk mengendalikan pertumbuhan dan perkembangan jaringan maupun organ tanaman. Terdapat dua golongan zat pengatur tumbuh yang paling sering digunakan dalam kultur *in vitro* yaitu golongan auksin dan sitokinin.

Salah satu ZPT dari kelompok sitokinin yang sering digunakan adalah 6-*Benzyl Amino Purine* (BAP) yang berfungsi untuk merangsang pembelahan sel serta pembentukan tunas, sedangkan dari kelompok auksin ZPT yang sering digunakan adalah *Naphtalene Acetic Acid* (NAA) yang dikenal membantu untuk pemanjangan sel, pembentukan akar, dan pembentukan kalus. Kedua ZPT tersebut merupakan dua jenis ZPT yang sering digunakan dalam induksi kalus. Meskipun setiap spesies tanaman memiliki respons yang berbeda terhadap kombinasi tersebut, kedua ZPT ini sering digunakan secara bersamaan untuk menciptakan keseimbangan hormon yang mendukung pembentukan kalus secara optimal (Walangadi et al., 2025).

2.1.7.1 6-*Benzyl Amino Purine* (BAP)

Zat pengatur tumbuh dari golongan sitokinin yang paling sering dimanfaatkan dalam berbagai penelitian kultur *in vitro* adalah 6-*Benzyl Amino Purine* (BAP) (Rahmah et al., 2023). Senyawa ini merupakan turunan dari adenin

dan berperan penting dalam mengatur proses pembelahan serta morfogenesis sel. Sitokinin berfungsi untuk merangsang aktivitas sel yang berada dalam kondisi dorman, memengaruhi metabolisme sel, serta menstimulasi pembentukan tunas dan proses pembelahan sel (Rahmat et al., 2024).



Gambar 2. 11 *6-Benzyl Amino Purine* (BAP)

(Sumber: Dokumentasi Peneliti)

6-Benzyl Amino Purine (BAP) yang terdapat pada (Gambar 2.11) merupakan zat pengatur tumbuh yang termasuk dalam kelompok sitokinin aktif dan berfungsi merangsang pembentukan tunas dalam jumlah banyak. Zat ini mudah diperoleh, memiliki harga yang relatif terjangkau, serta mampu menstimulasi pertumbuhan stek mikro (YACHYA et al., 2023). Selain itu, BAP juga berperan penting dalam proses pembelahan sel pada jaringan eksplan (Dila et al., 2021).

2.1.7.2 *Naphthalene Acetic Acid* (NAA)

Zat pengatur tumbuh golongan auksin yang sering digunakan dalam kultur *in vitro* adalah *Naphthalene Acetic Acid* (NAA) (Akbar M et al., 2017). *Naphthalene Acetic Acid* (NAA) merupakan salah satu jenis auksin sintesis yang berperan penting dalam proses pertumbuhan dan perkembangan jaringan tanaman. Senyawa ini berfungsi dalam merangsang pembelahan serta pembesaran sel, sehingga berkontribusi langsung terhadap pembentukan kalus (Causonis et al., 2022).



Gambar 2. 12 *Naphthalene Acetic Acid* (NAA)

(Sumber: Dokumentasi Peneliti)

Naphthalene Acetic Acid (NAA) (Gambar 2.12) mempunyai karakteristik yang lebih tahan lama serta stabil, tidak mudah teroksidasi oleh enzim, dan tidak mengalami degradasi (Andriyani et al., 2023). Menurut (Debitama et al., 2022) hormon auksin berperan dalam merangsang pembentukan jenis protein tertentu pada membran plasma tanaman. Protein tersebut berfungsi memompa ion H^+ ke arah dinding sel, sehingga memicu proses pemanjangan sel. Aktivitas ion H^+ tersebut mengaktifkan enzim tertentu yang menyebabkan terputusnya ikatan silang hidrogen pada rantai molekul selulosa penyusun dinding sel. Akibatnya, air masuk ke dalam sel tumbuhan melalui proses osmosis, yang kemudian menyebabkan sel tumbuhan mengalami pemanjangan.

2.2 Hasil Penelitian yang Relevan

Penelitian ini relevan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Wahyuni et al., 2020) mengenai induksi kalus Gaharu secara *in vitro* pada media *Murashige and Skoog* (MS) dengan penambahan ZPT *Benzyl Amino Purine* (BAP) dan *Naphthalene Acetic Acid* (NAA) menggunakan eksplan daun, hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan NAA 3,0 ppm + BAP 0,5 ppm merupakan perlakuan terbaik dalam pembentukan kalus dengan persentase keberhasilan mencapai 100%. Meskipun media dan jenis eksplan yang digunakan berbeda, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi BAP dan NAA efektif dalam menginduksi kalus pada tanaman Gaharu. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Karlianda et al. (2013) pada subkultur gaharu yang menunjukkan bahwa kombinasi

0,1 ppm NAA + 2,5 ppm BAP mampu memberikan respons pertumbuhan terbaik terhadap perkembangan jaringan gaharu secara *in vitro*. Hasil ini memperkuat bahwa kombinasi auksin dan sitokinin berperan penting dalam merangsang pembelahan dan diferensiasi sel pada kultur jaringan gaharu. Selain itu penelitian yang dilakukan oleh Maharani, (2023a) menggunakan eksplan tunas muda tanaman karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) yang dikultur secara *in vitro* pada media *Woody Plant Medium* (WPM) dengan penambahan kombinasi zat pengatur tumbuh BAP dan NAA. Kombinasi yang digunakan yaitu BAP dengan konsentrasi 1 mg/L, 1,5 mg/L, dan 2 mg/L, serta NAA dengan konsentrasi 0,5 mg/L dan 1 mg/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa eksplan tunas berukuran 1 cm mampu menghasilkan kalus berwarna putih dengan tekstur kompak, yang muncul lebih cepat pada minggu ke-2 dan memiliki ukuran rata-rata 0,3 cm. Kalus yang terbentuk bersifat embriogenik muda, berwarna putih karena belum mengandung klorofil namun kaya akan cadangan pati. Penelitian ini relevan karena sama-sama menggunakan media WPM, kombinasi BAP dan NAA, serta tanaman berkayu.

Hasil serupa juga dilaporkan oleh Juharni (2024) mengenai kultur buku batang durian lahung (*Durio dulcus*) dengan perbandingan penggunaan media MS dan juga WPM, serta konsentrasi BAP, hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata muncul kalus pada media MS adalah 38 HST, pada media WPM rata-rata kalus muncul pada 22,6 HST, sedangkan rata-rata muncul kalus pada perlakuan BAP paling cepat itu pada konsentrasi 0,5 ppm dan 1,0 ppm. Pemilihan eksplan pucuk dalam penelitian ini juga di dukung oleh beberapa penelitian terdahulu. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Isah, 2019) pada *Gymnema sylvestre*, tanaman berkayu berkhasiat obat, menggunakan eksplan pucuk muda (*shoot tip*) yang diinduksi pada media MS dengan tambahan BAP 2,0 mg/L , menunjukkan hasil rata-rata $7,92 \pm 0,81$ tunas per 0,5 g kalus dan efisiensi pembentukan mencapai 79%. Hal ini menunjukkan bahwa eksplan pucuk memiliki kemampuan regeneratif tinggi karena mengandung jaringan meristematik aktif dan hormon endogen yang mendukung proses dediferensiasi serta pembelahan sel. Penelitian (Akram & Aftab, 2016) pada tanaman jati (*Tectona grandis*), yang juga merupakan tanaman berkayu, menunjukkan bahwa penggunaan eksplan pucuk (*shoot tip*) berhasil membentuk

kultur embriogenik dan regenerasi tanaman secara efisien. Hal ini menunjukkan bahwa jaringan pucuk memiliki kompetensi tinggi dalam pembentukan kalus karena mengandung sel-sel muda yang aktif membelah. Selain faktor ZPT dan jenis eksplan, pemilihan media dasar juga menjadi faktor penting. Penelitian Lloyd & McCown, (1980) menjelaskan bahwa media Woody Plant Medium dikembangkan khusus untuk tanaman berkayu karena memiliki kandungan garam mineral lebih rendah dibandingkan media MS, sehingga lebih sesuai untuk mendukung pertumbuhan jaringan tanaman berkayu yang sensitif terhadap tekanan osmotik tinggi.

Penelitian ini penting dilakukan karena hingga saat ini belum banyak kajian yang secara spesifik meneliti efektivitas kombinasi zat pengatur tumbuh *6-Benzyl Amino Purine* (BAP) dan *Naphthalene Acetic Acid* (NAA) terhadap inisiasi kalus pada tanaman Gaharu (*Aquilaria malaccensis*) secara *in vitro*. Meskipun beberapa penelitian sebelumnya telah menggunakan BAP dan NAA pada berbagai jenis tanaman berkayu dan tanaman obat, namun setiap spesies memiliki respons fisiologis yang berbeda terhadap jenis dan konsentrasi ZPT yang diberikan. Oleh karena itu, penelitian ini berperan penting dalam menentukan kombinasi konsentrasi BAP dan NAA yang paling efektif untuk menginduksi kalus Gaharu, sehingga dapat mendukung pengembangan teknik kultur jaringan sebagai upaya konservasi dan perbanyakan tanaman langka *Aquilaria malaccensis* secara berkelanjutan.

2.3 Kerangka Konseptual

Aquilaria malaccensis merupakan salah satu tanaman penghasil gubal Gaharu yang memiliki nilai ekonomis yang tinggi. Gaharu juga dikenal dengan nama lain *sapwood*, *karas*, *mengaras*, *alim*, *rakes*, *sigsigi*, *agarwood*, *aloeswood*, *oud*, dan *eaglewood*. Di Indonesia gaharu digunakan sebagai bahan dasar obat, parfum, kosmetik, aroma terapi, sabun, pelembab, antiseptik, antimikroba, perangsang saraf dan pernapasan, serta digunakan dalam kegiatan ritual keagamaan, dan kebudayaan. Permintaan terhadap gubal gaharu dipasaran saat ini semakin meningkat, oleh karena itu untuk memenuhi keinginan pasar menyebabkan

adanya eksploitasi secara berlebihan sehingga populasi *Aquilaria malaccensis* di habitat alaminya semakin berkurang. Saat ini *Aquilaria malaccensis* masuk dalam IUCN *Red List* yang dikategorikan “Sangat Terancam Punah”. Selain itu pertumbuhan alami dari *Aquilaria malaccensis* juga mengalami tantangan dimana daya kecambah biji *Aquilaria malaccensis* tergolong rendah, hanya sekitar 47%, tanaman ini juga mulai berbunga dan berbuah pada usia 7-10 tahun, sedangkan pada petani atau penebang itu sudah mulai memanen gaharu ini pada usia 5 tahun. Perbanyakan secara stek dan cangkok juga memerlukan waktu yang lama untuk menghasilkan anakan dalam jumlah banyak.

Oleh karena itu perlu upaya konservasi yang efektif, cepat, dan dapat menghasilkan anakan yang banyak dengan sifat yang sama seperti indukannya. Salah satu solusi yang dapat dilakukan untuk menyelamatkan *Aquilaria malaccensis* yaitu dengan teknik kultur *in vitro*. Teknik kultur jaringan (*in vitro*) hadir sebagai solusi bioteknologi yang menjanjikan untuk memperbanyak tanaman dalam jumlah besar, seragam, dan dalam waktu relatif singkat. Proses ini dilakukan dengan menumbuhkan bagian tanaman seperti sel, jaringan, atau organ secara aseptik pada media khusus di bawah kondisi yang terkontrol. Tahap awal yang sangat penting dalam kultur jaringan adalah inisiasi kalus, karena kalus berperan sebagai sumber bahan tanam yang mampu berkembang menjadi individu baru. Keberhasilan dalam teknik *in vitro* sangat bergantung pada komposisi media dan kombinasi Zat Pengatur Tumbuh (ZPT). Kombinasi auksin seperti NAA dan sitokinin seperti BAP berperan penting dalam mengatur pembelahan serta diferensiasi sel tanaman. Auksin berfungsi dalam pembentukan akar, kalus, dan embriogenesis, sedangkan sitokinin merangsang pembelahan sel dan pembentukan tunas. Interaksi antara kedua hormon ini menentukan arah perkembangan eksplan dalam kultur jaringan.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian mengenai efektivitas kombinasi ZPT BAP dan NAA terhadap pertumbuhan tunas *Aquilaria malaccensis* secara *in vitro* menjadi sangat relevan. Penelitian ini diharapkan dapat menemukan kombinasi ZPT yang paling optimal untuk mendukung pertumbuhan tunas, sehingga dapat meningkatkan efisiensi perbanyakan bibit gaharu. Dengan demikian, hasil

penelitian ini diharapkan berkontribusi terhadap upaya konservasi *Aquilaria malaccensis* secara berkelanjutan serta mendukung pelestarian sumber daya hayati Indonesia.

2.4 Hipotesis Penelitian

Dari kerangka berpikir tersebut, maka dapat diambil hipotesis yaitu:

- H₀ : Kombinasi Zat Pengatur Tumbuh BAP dan NAA dengan berbagai konsentrasi tidak menunjukkan efektivitas terhadap inisiasi kalus *Aquilaria malaccensis* secara *in vitro*.
- H_a : Kombinasi Zat Pengatur Tumbuh BAP dan NAA dengan berbagai konsentrasi menunjukkan efektivitas terhadap inisiasi kalus *Aquilaria malaccensis* secara *in vitro*.