

Evaluasi Potensi Antikanker Senyawa Daun Kelor melalui Kimia Medisinal

(Evaluation of Anticancer Potential of Moringa Leaf Compounds through Medicinal Chemistry)

Saeful Amin¹, Nisrina Putri Rusiyana², Delya Pujiyanti^{3*}, Shafa Meyliana Azzahara⁴

Universitas Bakti Tunas Husada, Jawa Barat, Indonesia^{1,2,3,4}

saefulamin@universitas-bth.ac.id¹, putrirusiyana@gmail.com², delyapujiyanti3@gmail.com^{3*}, shfameyliana295@gmail.com⁴



Riwayat artikel

Diterima pada 3 Agustus 2024

Revisi 1 pada 9 Agustus 2024

Revisi 2 pada 13 Agustus 2024

Revisi 3 pada 22 Agustus 2024

Disetujui pada 18 September 2024

Abstract

Purpose: This study aimed to assess the potential of bioactive compounds found in moringa (*Moringa oleifera*) leaves as agents to treat breast cancer using a medicinal chemistry approach.

Methodology/approach: This study was conducted using a descriptive and qualitative literature review approach, utilizing data sources from various relevant scientific journals published in the last five years.

Results/findings: This study showed that four key compounds, moringin, kaempferol, quercetin, and nanoquercetin, have significant biological potential in inhibiting the growth and spread of breast cancer cells through various molecular mechanisms. The combination of these compounds provides a synergistic and selective therapeutic approach and shows potential in the development of more effective cancer therapies with minimal side effects. However, challenges related to pharmacokinetic limitations, especially in quercetin, can be overcome through technological innovations, such as nano-based delivery systems.

Conclusions: This study concludes that bioactive compounds in *Moringa oleifera* leaves possess promising anticancer properties against breast cancer through diverse molecular mechanisms. Their synergistic potential highlights the relevance of natural compounds in the development of selective and effective cancer therapies.

Limitations: The study was limited by its reliance on secondary data from literature sources and lack of experimental validation. Additionally, pharmacokinetic challenges, especially for quercetin, necessitate further research on delivery system optimization.

Contributions: This research adds valuable insights into the medicinal chemistry of natural compounds, particularly in the Indonesian context. It also encourages the development of innovative drug delivery technologies to enhance the clinical applications of plant-derived anticancer agents.

Keywords: *Bioactive Compounds, Breast Cancer, Medicinal Chemistry, Moringa Oleifera*

How to Cite: Amin, S., Rusiyana, N, P. Pujiyanti, D., Azzahara, S, M. (2024) Evaluasi Potensi Antikanker Senyawa Daun Kelor melalui Kimia Medisinal. *Jurnal Ilmu Medis Indonesia*, , 4(1), 75-82.

1. Pendahuluan

Kanker adalah salah satu penyakit yang mematikan di dunia ditandai dengan pertumbuhan sel abnormal yang tidak terkendali yang dapat menyebar ke jaringan dan organ lain (metastasis). Berdasarkan data Global Cancer Observatory (GLOBOCAN) tahun 2020, tercatat lebih dari 19 juta kasus kanker baru dan hampir 10 juta kematian akibat kanker secara global (Sung et al., 2021). Dari berbagai jenis kanker

yang ada, kanker payudara merupakan jenis yang paling umum ditemukan pada perempuan di seluruh dunia. Menyumbang sekitar 22% dari total kasus kanker pada perempuan, serta menjadi penyebab kematian akibat kanker tertinggi kedua setelah kanker paru-paru (Hero, 2021). Di Indonesia, kanker payudara menduduki posisi teratas, diikuti oleh kanker serviks dan kanker paru-paru, dengan jumlah kasus yang diperkirakan sekitar 400.000 pada tahun 2020 (IARC, 2020). Kanker payudara atau *Carcinoma mammae*, adalah jenis tumor ganas yang muncul akibat pertumbuhan sel abnormal yang meningkat pada sel epitel duktus atau lobulus di jaringan payudara. Kondisi ini dapat menyebabkan sel dan jaringan payudara tubuh lainnya, yang dikenal sebagai metastasis.

Berbagai metode pengobatan telah digunakan, termasuk kemoterapi yang bekerja melalui mekanisme terapi terarah dengan cara menghambat pertumbuhan atau membunuh sel kanker secara langsung. Namun, efektivitas terapi ini sering kali disertai dengan efek samping yang serius pada sel-sel normal, serta memerlukan biaya yang cukup tinggi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif yang lebih aman, efektif, dan terjangkau (Wee et al., 2021).

Pendekatan yang menjanjikan adalah eksplorasi senyawa bioaktif dari sumber alami melalui metode kimia medisinal. Kimia medisinal adalah cabang ilmu kimia yang fokus pada desain, sintesis dan pengembangan senyawa kimia untuk digunakan sebagai agen terapeutik (Qanith, Tejasari, & Islami, 2023). Metode ini memungkinkan analisis hubungan antara struktur dan aktivitas senyawa bioaktif dalam menghambat jalur molekuler yang berhubungan dengan kanker. Tanaman daun kelor (*Moringa oleifera*) menjadi salah satu sumber alami yang berpotensi karena telah lama digunakan dalam pengobatan tradisional (Amin, Supriatna, Ardian, & Abdurrahman, 2024). Berbagai bagian dari tanaman kelor seperti daun, biji, kulit batang dan akar mengandung senyawa bioaktif seperti flavonoid, polifenol, alkaloid, glukosinolat, tannin, saponin, serta oksalat. Senyawa tersebut memiliki aktivitas farmakologis, seperti antikanker, antioksidan, dan antiproliferasi (Amin, Aryanti, & Aprilia, 2023).

Dengan menggunakan metode pendekatan kimia medisinal, potensi senyawa-senyawa bioaktif dari *Moringa oleifera* dapat dievaluasi sebagai agen antikanker payudara dengan menganalisis mekanisme kerjanya secara molekuler serta interaksinya dengan target biologis tertentu. Pendekatan ini memberikan dasar dalam memahami bagaimana struktur kimia suatu senyawa berkontribusi terhadap aktivitas biologisnya, terutama dalam menghambat pertumbuhan sel kanker (Amin, Wihdatunnisa, Aisyah, & Kurniawan, 2024). Melalui pemahaman ini senyawa bioaktif tidak hanya dilihat dari perspektif alamnya, tetapi juga dari cara kerjanya dalam menargetkan protein spesifik yang terlibat dalam jalur proliferasi, apoptosis, atau resistensi obat.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa senyawa bioaktif dalam daun kelor memiliki aktivitas farmakologis yang signifikan terhadap sel kanker payudara. Misalnya, penelitian oleh Alotaibi and Bahammam (2021), mengungkapkan bahwa ekstrak etanol daun kelor mampu menginduksi apoptosis pada sel kanker payudara MCF-7 melalui mekanisme peningkatan ROS dan ekspresi protein pro-apoptotik. Selain itu, kajian oleh Shehzad, Pandey, Malhotra, and Gupta (2021), menyoroti peran senyawa kaempferol dalam penghambatan proliferasi sel kanker melalui jalur sinyal PI3K/Akt/mTOR. Penelitian lainnya oleh Ma et al. (2020), menunjukkan bahwa *quercetin* memiliki aktivitas sitotoksik terhadap sel kanker payudara triple-negatif, namun bioavailabilitas rendah menjadi tantangan utama. Sementara itu, studi oleh Gainutdinov et al. (2023), juga mendukung efektivitas senyawa moringin dalam menghambat pertumbuhan sel kanker melalui regulasi gen apoptosis dan jalur inflamasi.

Kebaharuan (*Novelty*) dari penelitian ini adalah penekanan pada potensi sinergis dari empat senyawa bioaktif utama dalam daun kelor, moringin, kaempferol, quercetin, dan nanoquercetin dalam menghambat pertumbuhan dan penyebaran sel kanker payudara melalui pendekatan kimia medisinal. Tidak seperti penelitian sebelumnya yang cenderung fokus pada satu senyawa tunggal atau uji aktivitas *in vitro* secara terpisah, penelitian ini mengintegrasikan pendekatan komprehensif dari kombinasi senyawa alami serta mengeksplorasi pemanfaatan teknologi penghantaran berbasis nano untuk mengatasi tantangan farmakokinetik, terutama pada *quercetin*.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis mendalam mengenai kontribusi kimia medisinal dalam berbagai fase pengembangan obat baru. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren dan inovasi terbaru serta merumuskan prospek pertimbangan di masa yang akan datang, khususnya dalam konteks Indonesia. Kajian ini menjelaskan bagaimana peranan kimia medisinal dalam menghadapi tantangan yang utama dalam pengembangan obat, diantaranya optimasi sifat fisikokimia, peningkatan bioavailabilitas, dan pengurangan toksisitas.

2. Landasan Teoritis dan Pengembangan Hipotesis

2.1 Landasan Teoritis

Kimia medisinal adalah cabang ilmu kimia yang mempelajari desain, sintesis, dan pengembangan senyawa kimia sebagai agen terapeutik. Fokus utama dari pendekatan ini adalah memahami hubungan struktur-aktivitas (*Structure-Activity Relationship/SAR*) suatu molekul terhadap target biologis. Dengan pendekatan ini, senyawa alami seperti fitokimia dapat dievaluasi potensi terapeutiknya secara sistematis. Proses ini mencakup penilaian terhadap afinitas molekul terhadap reseptor, enzim, atau jalur biologis tertentu (Heng et al., 2021). Senyawa bioaktif dari tumbuhan, seperti flavonoid dan glukosinolat, diketahui memiliki aktivitas biologis yang kompleks dan sering digunakan sebagai titik awal dalam penemuan obat. Mekanisme kerja senyawa ini sering melibatkan penghambatan proliferasi sel, penginduksian apoptosis, dan modulasi sistem imun (Pop, Kerezsi, & Ciont, 2022). Dalam konteks kimia medisinal, penting untuk mengevaluasi interaksi molekuler antara senyawa tersebut dengan protein target melalui pendekatan *in silico* atau desain berbasis struktur. Hal ini memungkinkan prediksi awal terhadap aktivitas farmakologis suatu senyawa.

Flavonoid adalah kelompok senyawa polifenol yang umum ditemukan pada tanaman dan memiliki struktur cincin aromatik dengan substituen hidroksil. Dalam teori kimia medisinal, struktur ini berperan dalam donasi elektron, stabilisasi radikal bebas, dan interaksi dengan jalur pensinyalan sel. Aktivitas farmakologisnya dapat dianalisis melalui pendekatan molekuler untuk menilai potensi afinitas terhadap target kanker tertentu. Struktur kimia flavonoid memungkinkan variasi derivatif untuk meningkatkan efektivitas biologisnya (Loschwitz et al., 2021). Glukosinolat dan turunannya seperti isothiocyanate merupakan senyawa belerang alami yang dikenal memiliki sifat reaktif terhadap protein dan enzim seluler. Dalam konteks kimia medisinal, reaktivitas tersebut menjadi dasar potensinya dalam memodulasi jalur-jalur seluler yang terlibat dalam perkembangan kanker. Proses metabolisme senyawa ini menghasilkan turunan aktif yang dapat berinteraksi dengan molekul target melalui ikatan kovalen reversibel. Pengetahuan tentang reaktivitas kimia ini penting untuk merancang analog senyawa yang lebih stabil dan selektif (Kharechkina et al., 2019).

Sistem penghantaran obat berbasis nanopartikel menjadi fokus utama dalam pengembangan terapi kanker berbasis senyawa alam. Dalam kimia medisinal, sistem ini digunakan untuk meningkatkan kelarutan, stabilitas, dan bioavailabilitas senyawa yang memiliki keterbatasan farmakokinetik. Formulasi nano memungkinkan pelepasan terkendali dan peningkatan akumulasi senyawa di jaringan target melalui efek *enhanced permeability and retention* (EPR). Pendekatan ini secara teoritis memperkuat efektivitas terapi dan mengurangi toksisitas sistemik (Banerjee, Nimkar, Naik, & Patravale, 2022).

2.2 Pengembangan Hipotesis

Adapun pengembangan hipotesis yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

H₀: Senyawa bioaktif yang terkandung dalam daun kelor (*Moringa oleifera*) tidak memiliki potensi signifikan sebagai agen antikanker payudara berdasarkan pendekatan kimia medisinal.

H₁: Senyawa bioaktif yang terkandung dalam daun kelor (*Moringa oleifera*) memiliki potensi signifikan sebagai agen antikanker payudara berdasarkan pendekatan kimia medisinal.

3. Metodologi penelitian

Bagian Metode yang digunakan dalam penelitian adalah kajian pustaka (*literature review*) yang bersifat deskriptif dan kualitatif. Tinjauan pustaka merupakan proses penelusuran dan penelitian literatur yang digunakan dengan membaca jurnal, buku, dan publikasi lainnya yang relevan dengan topik penelitian

dengan tujuan untuk menghasilkan tulisan yang berkaitan dengan isu dan tema tertentu (Khaneghahi, Sefatgol, & Siyasar, 2022). Sumber data diperoleh melalui Google Scholar, Pubmed, dan ScienceDirect yang dipublikasikan dalam lima tahun ke belakang (2020-2025) menggunakan bahasa Indonesia dan bahasa Inggris (Junias, Budiana, Adu, Wijaya, & Kiling, 2021). Kata kunci yang digunakan yaitu: *Moringa oleifera*, daun kelor, senyawa bioaktif, kanker payudara, antikanker, dan kimia medisinal. Pemilihan artikel ini dilakukan dengan mempertimbangkan kriteria inklusi, yaitu, artikel yang membahas kandungan senyawa aktif pada daun kelor serta pengaruhnya terhadap kanker payudara. Selain itu, artikel yang mendukung pendekatan kimia medisinal, seperti studi *in silico* dan *in vitro*.

4. Hasil dan Pembahasan

Artikel tinjauan pustaka ini mengacu pada dua artikel. Untuk memperjelas dan memperkuat hasil tinjauan pustaka yang telah disampaikan, penulis menyusun ringkasan data dari beberapa penelitian yang relevan mengenai mekanisme kerja, sumber senyawa, serta potensi pengembangan senyawa bioaktif melalui pendekatan kimia medisinal. Ringkasan ini mencakup informasi tentang jenis senyawa bioaktif, asal senyawa, aktivitas utama, serta model uji. Penyajian dalam bentuk tabel diharapkan mampu memberikan gambaran yang sistematis dan komprehensif mengenai kontribusi senyawa-senyawa tersebut dalam pengembangan terapi antikanker payudara yang lebih efektif dan selektif melalui inovasi kimia medisinal.

Tabel 1. Senyawa bioaktif daun kelor sebagai agen antikanker

No	Senyawa Bioaktif	Asal Senyawa	Aktivitas Utama	Referensi
1.	Moringin, Moringenin, Isothiocynate	Daun dan Biji	Antikanker, Antiinflamasi, Antioksidan	(Sodvadiya, Patel, Mishra, & Nair, 2020)
2.	Kaempferol	Daun Kelor	Menurunkan viabilitas sel kanker payudara ER+ dan TNBC	(Sodvadiya et al., 2020)
3.	Quercetin	Daun Kelor	Antioksidan kuat, menekan proliferasi MCF-7 dan TNBC	(Sodvadiya et al., 2020)
4.	Nanoquercetin	Modifikasi nanoteknologi dari quercetin alami	Antikanker, Antioksidan, meningkatkan sensitivitas terhadap kemoterapi	(Samantaray et al., 2024)

Sumber: Diolah pribadi (2024)

Berdasarkan penelitian di atas mengenai senyawa alami sebagai agen antikanker menunjukkan potensi yang signifikan dalam pengembangan terapi kanker modern. Berdasarkan analisis terhadap dua artikel yang membahas *Moringa oleifera* teridentifikasi empat senyawa utama yang memiliki aktivitas kuat dalam menghambat pertumbuhan sel kanker, yaitu moringin (isothiocynate), kaempferol, quercetin, dan nanoquercetin.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sodvadiya et al. (2020), moringin Isothiocynates yang berasal dari daun dan biji kelor menunjukkan aktivitas antikanker yang menonjol, terutama terhadap sel kanker payudara tipe MCF-7 dan MDA-MB-231. Dalam kimia medisinal, struktur moringin yang mengandung gugus Isothiocynate ($-N=C-S$) diketahui sangat reaktif dan dapat berikatan secara kovalen dengan residu sistein pada protein target, seperti NF- κ B dan enzim yang mengatur siklus sel. Senyawa ini dilaporkan dapat menginduksi ekspresi protein anti-apoptotik bcl-2. Selain itu, moringin juga mengaktifkan jalur Nrf2, yang meningkatkan ekspresi enzim protektif seperti NQO1 dan HO-1 serta mengurangi stres oksidatif intraseluler. Mekanisme ini menunjukkan bahwa moringin beroperasi melalui pendekatan multi target, menjadikannya kandidat yang kuat untuk terapi kanker berbasis senyawa ini. Kaempferol yang juga terdapat dalam daun kelor, menunjukkan potensi yang signifikan terhadap sel kanker payudara, baik yang memiliki reseptor positif maupun yang tergolong TNBC. Kaempferol memiliki kemampuan untuk menghambat aktivitas CDK2, enzim penting dalam transisi dari fase G1

ke S dalam siklus ini, serta memodulasi ekspresi p21 dan p27. Aktivitas antiproliferasi kaempferol diperkuat oleh peningkatan spesifik reactive oxygen species (ROS) yang menyebabkan kerusakan seluler yang terkontrol, serta kemampuannya dalam menekan aktivitas kinases pada jalur P13K/Akt yang sering aktif dalam kanker payudara. Efek ini menjadikan kaempferol sebagai agen kemopreventif dan terapeutik.

Berdasarkan penelitian yang sama, quercetin yang berasal dari daun kelor menunjukkan potensi antikanker yang besar melalui pengaturan ekspresi berbagai target molekuler. Senyawa ini berfungsi dengan menghambat jalur proliferasi P13k/Akt/mTOR, meningkatkan ekspresi p53 dan caspase-3, serta menurunkan kadar Bcl-2 dan protein yang berkontribusi pada resistensi obat seperti P-glicoprotein dan BCRP (Mwosi, Eton, Aluonzi, Olupot, & Alia, 2024). Meskipun quercetin memiliki interaksi yang baik dengan protein target, tantangan dalam aplikasi klinis muncul akibat keterbatasan farmakokinetik, seperti bioavailabilitas yang rendah dan metabolisme yang cepat.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berdasarkan penelitian oleh Salhab, Joseph, and Samad (2023), dikembangkan nanoquercetin, yaitu quercetin dalam sistem penghantaran berbasis nanoteknologi seperti solid lipid nanoparticle dan liposom. Formulasi ini meningkatkan kelarutan, stabilitas, dan akumulasi senyawa dalam jaringan tumor, serta memungkinkan penghantaran tertarget melalui efek Enhanced Permeability and Retention (EPR). Nanoquercetin secara efektif terhadap sel kanker payudara tipe triple-negative (TNBC), dengan mekanisme kerja yang mencakup penekanan jalur NF- κ B dan STAT3, peningkatan apoptosis serta penurunan ekspresi protein sintesis obat.

Dari sudut pandang molekuler, senyawa aktif yang terdapat dalam daun kelor menunjukkan kemampuan untuk memodulasi epigenetik, termasuk pengaruh terhadap ekspresi lncRNA dan mikroRNA yang berperan dalam regulasi gen kanker (Sultan et al., 2023). Beberapa penelitian mengindikasikan bahwa quercetin dan nanoquercetin dapat menurunkan ekspresi miR-21 dan miR-155, dua mikroRNA yang diketahui berkontribusi pada resistensi obat dan agresivitas kanker payudara. Selain itu senyawa-senyawa ini juga berperan dalam pengaturan ekspresi DNA methyltransferase (DNMTs) dan histone deacetylase (HDACs) yang berperan untuk menonaktifkan gen penekan tumor.

Selaras dengan hal tersebut, kombinasi dari empat senyawa utama dalam daun kelor yaitu moringin, kaempferol, quercetin, dan nanoquercetin menawarkan pendekatan sinergis dalam pengembangan terapi untuk kanker payudara. Setiap senyawa beroperasi melalui jalur biologis dan target molekuler yang berbeda, namun saling melengkapi dalam menghambat pertumbuhan dan penyebaran sel kanker (Rajkumar et al., 2024). Moringin saling melengkapi dalam menghambat pertumbuhan dan penyebaran sel kanker. Moringin berfokus pada pengurangan stres oksidatif dan inflamasi yang menjadi pemicu inisiasi kanker, kaempferol mengatur jalur siklus sel dan memicu penangkapan pada fase G1/S, quercetin menghambat proliferasi dan meningkatkan sensitivitas terhadap obat, sementara nanoquercetin berfungsi sebagai penguat bioaktivitas dan efektivitas senyawa flavonoid melalui sistem penghantaran yang presisi.

Selanjutnya, integrasi senyawa bioaktif dari daun kelor ke dalam sistem terapi kanker modern memerlukan struktur berbasis teknologi. Secara kimia, setiap senyawa seperti moringin, kaempferol, quercetin dan nanoquercetin memiliki karakteristik struktural yang mendukung interaksi dengan target molekuler kanker, namun masih menghadapi tantangan seperti kelarutan, stabilitas, dan efektivitas penghantaran intraseluler (Putri & Yuniarti, 2023). Oleh karena itu, dalam pengembangan terapinya, diperlukan dukungan formulasi lanjutan yang berbasis nanoteknologi, seperti nanopartikel lipid, liposom, atau polimer biodegradable yang memungkinkan penghantaran yang terarah, pelepasan yang terkontrol, dan akumulasi pada jaringan tumor melalui mekanisme Enhanced Permeability and Retention (EPR). Strategi ini tidak hanya meningkatkan efikasi terapi dan mengurangi toksisitas sistemik, tetapi juga memungkinkan penyesuaian terapi terhadap subtipe kanker payudara yang berbeda berdasarkan profil molekulernya.

Walaupun potensi farmakologis dari senyawa-senyawa yang terdapat dalam daun kelor telah banyak dicatat melalui penelitian *in vitro* dan *in silico*, masih terdapat tantangan signifikan dalam proses

translasinya ke aplikasi klinis. Beberapa masalah yang harus diatasi meliputi optimasi bioavailabilitas, penentuan dosisi terapeutik yang aman, dan verifikasi efektivitas *in vivo* pada model hewan dan manusia. Selain itu, interaksi antara senyawa aktif, baik yang bersifat sinergis maupun antagonistik, masih memerlukan penelitian yang mendalam agar formulasi kombinasi yang dihasilkan dapat memberikan manfaat terapeutik yang optimal. Dalam kimia medisinal, diperlukan pendekatan yang komprehensif yang mencakup analisis farmakofor, pengujian prediksi toksitas, serta desain dan sintesis derivatif untuk meningkatkan profil farmakokinetik. Oleh karena itu, pengembangan senyawa bioaktif dari *Moringa oleifera* memerlukan kolaborasi lintas disiplin antara ilmu kimia, biologi molekuler, dan teknologi nano untuk memastikan bahwa potensi yang telah terbukti dapat diterjemahkan menjadi produk terapeutik yang efektif, aman, dan aplikasi di dunia klinis.

Seiring dengan meningkatnya permintaan untuk terapi kanker yang lebih selektif, efektif, dan dengan efek samping yang minimal, penelitian yang berfokus pada senyawa aktif alami, seperti yang terdapat dalam daun kelor, menjadi solusi yang strategis dan relevan. Potensi senyawa bioaktif dari *Moringa oleifera* tidak hanya mencerminkan kemampuan farmakologi alami, tetapi juga menunjukkan arah baru dalam penelitian penemuan obat berbasis etnofarmakologi. Dengan pendekatan yang berdasarkan pada ilmu dasar kimia medisinal dari biologi molekuler, senyawa-senyawa ini dapat dijadikan dasar untuk pengembangan agen terapeutik baru yang lebih terarah, termasuk peluang untuk diformulasikan menjadi produk biofarmasi inovatif di dalam negeri.

5. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa daun kelor (*Moringa oleifera*) memiliki potensi sebagai agen antikanker payudara melalui kandungan senyawa bioaktifnya yang dikaji dari perspektif kimia medisinal. Berdasarkan hasil tinjauan pustaka terhadap sejumlah studi ilmiah, ditemukan empat senyawa utama yang berperan penting dalam menghambat pertumbuhan dan penyebaran sel kanker payudara, yaitu moringin, kaempferol, quercetin, dan nanoquercetin. Moringin, sebagai senyawa glukosinolat khas, bekerja dengan cara mengurangi stres oksidatif serta mengaktifkan jalur perlindungan sel seperti Nrf2, yang penting dalam mempertahankan keseimbangan sel dan mencegah kerusakan DNA. Kaempferol, flavonoid alami yang juga terkandung dalam daun kelor, berfungsi menghambat transisi fase dalam siklus sel kanker, terutama fase G2/M, serta menekan aktivitas enzim seperti PI3K dan Akt yang berperan dalam proliferasi sel. Selain itu, kaempferol juga menunjukkan aktivitas antiangiogenesis yang dapat menghambat pembentukan pembuluh darah baru pada tumor. Sementara itu, quercetin diketahui mampu menargetkan berbagai jalur molekuler kanker, seperti jalur MAPK dan NF- κ B, serta meningkatkan ekspresi gen penekan tumor seperti p53 dan menginduksi apoptosis tanpa merusak sel normal secara signifikan.

Untuk meningkatkan efektivitasnya, quercetin dapat diformulasikan dalam bentuk nanoquercetin melalui teknologi nanopartikel yang memungkinkan senyawa ini memiliki bioavailabilitas yang lebih baik, memperpanjang waktu paruh dalam tubuh, dan meningkatkan kemampuan untuk mencapai target sel kanker secara lebih selektif. Dengan demikian, kombinasi keempat senyawa ini menawarkan pendekatan terapeutik yang bersifat multi-target, sinergis, dan menjanjikan untuk pengembangan obat kanker payudara yang lebih efektif, aman, dan minim efek samping. Namun, untuk memastikan potensi ini secara klinis, diperlukan penelitian lanjutan berupa uji praklinis dan klinis guna mengevaluasi keamanan, efektivitas, serta dosis optimal penggunaannya dalam terapi kanker payudara.

Limitasi dan Studi Lanjutan

Limitasi utama dari penelitian ini terletak pada pendekatan yang digunakan, yaitu sebatas tinjauan pustaka (literature review) tanpa disertai validasi eksperimental secara langsung. Artinya, seluruh data dan kesimpulan yang diperoleh bersumber dari hasil penelitian sebelumnya, sehingga tidak dilakukan pengujian laboratorium atau eksperimen primer oleh penulis. Akibatnya, efektivitas biologis dari senyawa-senyawa aktif yang diidentifikasi, seperti moringin, kaempferol, quercetin, dan nanoquercetin, belum dapat dipastikan secara empiris dalam konteks penelitian ini, baik melalui pengujian *in vitro* (terhadap kultur sel) maupun *in vivo* (menggunakan model hewan percobaan). Selain itu, belum ada analisis langsung terkait parameter penting seperti toksisitas, selektivitas terhadap sel kanker

dibandingkan sel normal, bioavailabilitas, stabilitas senyawa dalam tubuh, serta potensi interaksi dengan senyawa lain yang dapat memengaruhi efektivitas terapeutik.

Oleh karena itu, studi lanjutan sangat disarankan untuk dilakukan guna memperkuat validitas temuan dalam penelitian ini. Penelitian lebih lanjut sebaiknya mencakup pengujian laboratorium secara *in vitro* terhadap garis sel kanker payudara, seperti MCF-7 atau MDA-MB-231, untuk mengamati efek antiproliferasi, induksi apoptosis, dan pengaruh terhadap jalur pensinyalan molekuler spesifik. Selain itu, uji *in vivo* pada hewan model seperti tikus atau mencit yang diinduksi tumor payudara diperlukan untuk menilai efektivitas terapeutik secara sistemik serta potensi efek samping yang mungkin timbul. Tidak kalah penting, karakterisasi farmakokinetik dan bioavailabilitas, khususnya terhadap formulasi nano seperti nanoquercetin, perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuan senyawa dalam mencapai target sel kanker secara efisien. Dengan demikian, hasil dari studi eksperimental lanjutan tersebut diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang lebih kuat dalam mendukung pengembangan obat kanker berbasis senyawa alami dari daun kelor (*Moringa oleifera*).

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Farmasi, Fakultas Farmasi, Universitas Bakti Tunas Husada atas segala bentuk dukungan yang telah diberikan selama proses penyusunan dan penulisan artikel ini. Dukungan tersebut mencakup penyediaan fasilitas akademik, akses terhadap sumber literatur ilmiah, serta bimbingan dan arahan dari dosen-dosen yang kompeten di bidangnya. Penulis juga sangat menghargai suasana akademik yang kondusif dan kolaboratif, yang telah menjadi faktor penting dalam kelancaran proses penelitian dan penulisan ilmiah ini. Tanpa kontribusi dan bantuan dari civitas akademika Fakultas Farmasi, Universitas Bakti Tunas Husada, artikel ini tidak akan tersusun dengan baik.

Referensi

- Alotaibi, M. H., & Bahammam, S. A. (2021). Determining the correlation between comorbidities and MERS-CoV mortality in Saudi Arabia. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 16(4), 591-595. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtumed.2021.02.003>
- Amin, S., Aryanti, R., & Aprilia, A. Y. (2023). *Studi In Silico Senyawa yang Terkandung dalam Kulit Buah Manggis (Garcinia mangostana L.) Sebagai Antikanker Payudara*. Paper presented at the Prosiding Seminar Nasional Diseminasi Penelitian Volume 3.
- Amin, S., Supriatna, G. T., Ardian, M. I., & Abdurrahman, M. I. (2024). Potensi Senyawa Turunan Terpenoid sebagai Agen Anti-Kanker. *Jurnal Ilmu Medis Indonesia*, 4(1), 53-61. doi:[10.35912/jimi.v4i1.4551](https://doi.org/10.35912/jimi.v4i1.4551)
- Amin, S., Wihdatunnisa, I., Aisyah, R., & Kurniawan, Y. S. (2024). Potensi Senyawa Kuersetin sebagai Antikanker Payudara melalui Pendekatan Molecular Docking. *Jurnal Ilmu Medis Indonesia*, 4(1), 41-51. doi:[10.35912/jimi.v4i1.4565](https://doi.org/10.35912/jimi.v4i1.4565)
- Banerjee, M., Nimkar, K., Naik, S., & Patravale, V. (2022). Unlocking the potential of drug-drug cocrystals—A comprehensive review. *Journal of Controlled Release*, 348, 456-469. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2022.06.003>
- Gainutdinov, T., Gizatullina, Z., Debska-Vielhaber, G., Vielhaber, S., Feldmann Jr, R. E., Orynbayeva, Z., & Gellerich, F. N. (2023). Corrigendum to "Age-associated alterations of brain mitochondria energetics"[*Biochem. Biophys. Res. Commun.* 643 (2023) 1-7]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 644, 171-171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2023.01.015>
- Heng, L., Zhao, M., Xu, R., Tao, R., Wang, C., Zhang, L., . . . Li, Y. (2021). Phragmalin and mexicanolide limonoids with reversal of multidrug resistance from the seeds of *Chukrasia tabularis* A. Juss. *Phytochemistry*, 182, 112606. doi:<https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2020.112606>
- Hero, S. (2021). Faktor Risiko Kanker Payudara. *Jurnal Medika Hutama*, 3(01 Oktober), 1533-1537.

- Junias, M., Budiana, I., Adu, A. A., Wijaya, R. P. C., & Kiling, I. Y. (2021). Bioactive compounds and anticancer activities of moringa oleifera of east nusa tenggara origin. *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, 15(3), 3554-3560.
- Khaneghahi, S., Sefatgol, S., & Siyasar, M. (2022). Investigating the relationship between school culture and academic enthusiasm with academic hope and motivation in high school students. *Journal of Social, Humanity, and Education*, 3(1), 29-41.
- Kharechkina, E. S., Nikiforova, A. B., Teplova, V. V., Odinkova, I. V., Krestinina, O. V., Baburina, Y. L., . . . Kruglov, A. G. (2019). Regulation of permeability transition pore opening in mitochondria by external NAD (H). *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1863(5), 771-783. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2019.01.003>
- Loschwitz, J., Jäckering, A., Keutmann, M., Olagunju, M., Eberle, R. J., Coronado, M. A., . . . Strodel, B. (2021). Novel inhibitors of the main protease enzyme of SARS-CoV-2 identified via molecular dynamics simulation-guided in vitro assay. *Bioorganic Chemistry*, 111, 104862. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2021.104862>
- Ma, X., Pang, J., Dong, R., Tang, C., Shu, Y., & Li, Y. (2020). Rapid prediction of multiple wine quality parameters using infrared spectroscopy coupling with chemometric methods. *Journal of food composition and analysis*, 91, 103509. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103509>
- Mwosi, F., Eton, M., Aluonzi, B., Olupot, S. P., & Alia, R. (2024). Business partnership, women empowerment and support to women living with HIV/AIDS in Kabale, Uganda. *Journal of Sustainable Tourism and Entrepreneurship*, 6(1), 15-29.
- Pop, O. L., Kerezsi, A. D., & Ciont, C. (2022). A comprehensive review of Moringa oleifera bioactive compounds—cytotoxicity evaluation and their encapsulation. *Foods*, 11(23), 3787.
- Putri, L. R., & Yuniarti, E. (2023). Literature Review: Effectiveness of Moringa Leaves (Moringa oleifera) to Diabetes Mellitus. *Jurnal Biologi Tropis*, 23(3), 369-373.
- Qanitah, Z., Tejasari, M., & Islami, U. (2023). *Systematic Review: Khasiat Antikanker Sediaan Daun Kelor (Moringa oleifera) terhadap Pertumbuhan Kanker Paru*. Paper presented at the Bandung Conference Series: Medical Science.
- Rajkumar, C., Ramsridhar, S., Veeraraghavan, V. P., Francis, A. P., Purushotham, M., & Mageshwari, U. (2024). Anticancer effect of Moringa oleifera in oral squamous cell carcinoma: a systematic review. *Discover Oncology*, 15(1), 1-11.
- Salhab, H. A. S., Joseph, J., & Samad, N. A. (2023). Molecular Targets Of Moringa Oleifera In Cancers (In Vitro And In Vivo): A Systematic Review. *Journal of Health and Translational Medicine (JUMMEC)*, 46-65.
- Samantaray, A., Pradhan, D., Nayak, N. R., Chawla, S., Behera, B., Mohanty, L., . . . Gandhi, S. (2024). Nanoquercetin based nanoformulations for triple negative breast cancer therapy and its role in overcoming drug resistance. *Discover Oncology*, 15(1), 452.
- Shehzad, S., Pandey, R., Malhotra, P., & Gupta, D. (2021). Computational design of novel allosteric inhibitors for Plasmodium falciparum DegP. *Molecules*, 26(9), 2742. doi:<https://doi.org/10.3390/molecules26092742>
- Sodvadiya, M., Patel, H., Mishra, A., & Nair, S. (2020). Emerging insights into anticancer chemopreventive activities of nutraceutical Moringa oleifera: Molecular mechanisms, signal transduction and in vivo efficacy. *Current Pharmacology Reports*, 6, 38-51.
- Sultan, R., Ahmed, A., Wei, L., Saeed, H., Islam, M., & Ishaq, M. (2023). The anticancer potential of chemical constituents of Moringa oleifera targeting CDK-2 inhibition in estrogen receptor positive breast cancer using in-silico and in vitro approaches. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, 23(1), 396.
- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians*, 71(3), 209-249.
- Wee, M. K., Cabantog, J., Magpayo, D. D., Sabido, N. L., Samson, E., & David, P. (2021). Factors causing vaccine hesitancy among parents in Bulacan. *Studies in Medicine and Public Health*, 1(1), 15-29.