

Potensi SIRIPLUS sebagai Balutan Luka Biodegradabel Berbasis Pati Singkong dan Ekstrak Sirih Merah (*Piper crocatum*): Systematic Literature Review

Mangde Anata Sindhu*

Universitas Warmadewa, Denpasar, Indonesia

f.anatasindhu.32@gmail.com*

| Received: 31/03/2026 | Revised: 27/05/2026 | Accepted: 06/06/2026 |

Copyright©2026 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

Abstrak

Luka kronis, khususnya ulkus diabetikum, merupakan salah satu tantangan medis global yang paling signifikan karena tingkat kekambuhan yang tinggi dan biaya perawatan yang besar. Pengembangan balutan luka modern yang bersifat biodegradabel, biokompatibel, dan memiliki aktivitas terapeutik aktif menjadi fokus utama dalam riset biomedis kontemporer. Laporan ini mengevaluasi potensi SIRIPLUS, sebuah inovasi balutan luka yang mengintegrasikan pati singkong (*Manihot esculenta*) sebagai matriks polimer alami dan ekstrak sirih merah (*Piper crocatum*) sebagai agen aktif farmakologis. Melalui metode *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengacu pada protokol PRISMA, analisis dilakukan terhadap efikasi kombinasi kedua bahan tersebut dalam hal aktivitas antioksidan, antibakteri, karakteristik mekanik, serta kemampuan biodegradasi. Sintesis data menunjukkan bahwa ekstrak *Piper crocatum* mengandung metabolit sekunder kunci seperti flavonoid, alkaloid, dan tanin yang mampu meregulasi jalur protein p53, E-cadherin, dan SOD1 untuk mempercepat re-epitelisasi dan deposisi kolagen. Pati singkong, sebagai matriks, menawarkan fleksibilitas dan kemampuan pembentukan film yang dapat dioptimalkan melalui penambahan plastisiser seperti gliserol untuk mencapai kuat tarik hingga 27 MPa dan laju transmisi uap air (WVTR) yang ideal untuk penyembuhan luka lembap. Studi ini menyimpulkan bahwa SIRIPLUS memiliki potensi besar sebagai balutan luka modern yang efektif secara klinis dan berkelanjutan secara lingkungan.

Kata kunci: SIRIPLUS; pati singkong; *Piper crocatum*; balutan luka; biodegradabel; penyembuhan luka

Abstract

Chronic wounds, particularly diabetic ulcers, remain a major global medical challenge due to their high recurrence rate and substantial treatment costs. Current biomedical research increasingly focuses on wound dressings that are biodegradable, biocompatible, and therapeutically active. This article evaluates the potential of SIRIPLUS, an innovative wound dressing that integrates cassava starch

(*Manihot esculenta*) as a natural polymer matrix and red betel leaf extract (*Piper crocatum*) as an active pharmacological agent. Using a systematic literature review approach referring to the PRISMA framework, the analysis synthesizes evidence on antioxidant and antibacterial activities, mechanical characteristics, and biodegradation performance. The reviewed studies indicate that *Piper crocatum* contains key secondary metabolites such as flavonoids, alkaloids, and tannins that may regulate p53, E-cadherin, and SOD1 pathways to support re-epithelialization and collagen deposition. Cassava starch offers film-forming ability, biocompatibility, and environmental degradability, while its physical performance can be optimized through plasticizers and cross-linking strategies. Overall, SIRIPLUS shows strong theoretical potential as an effective and environmentally sustainable modern wound dressing.

Keywords: SIRIPLUS; cassava starch; *Piper crocatum*; wound dressing; biodegradable

Pendahuluan

Manajemen luka kronis, khususnya ulkus diabetik, menghadapi tekanan klinis yang meningkat akibat pola penyembuhan yang lambat, risiko infeksi bakteri yang tinggi, serta biaya perawatan konvensional yang mahal. Variabilitas kondisi mikrolingkungan luka tersebut menurunkan kapasitas regenerasi sel, meningkatkan stres oksidatif, dan memicu inflamasi berkepanjangan, terutama pada pasien dengan komplikasi sistemik (Setyawati et al., 2021). Kondisi ini menuntut strategi pengelolaan luka yang adaptif dengan pendekatan berbasis alam untuk meningkatkan ketahanan fungsional balutan dan efikasi penyembuhan jaringan. Studi mengenai efektivitas balutan luka yang mengintegrasikan sifat biodegradabel dan aktivitas farmakologis aktif masih terbatas, terutama untuk konteks pemanfaatan polimer alami lokal. Sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan pada balutan luka sintesis non-degradabel atau penggunaan ekstrak herbal tanpa matriks pembawa yang stabil, sehingga diperlukan analisis yang lebih terfokus terhadap sinergi antara matriks biopolimer dan agen aktif (Januarti et al., 2019; Kurnia et al., 2024). Penelitian ini menerapkan metode *Systematic Literature Review* (SLR) berbasis PRISMA dengan ruang lingkup yang eksplisit pada kajian SIRIPLUS (kombinasi pati singkong dan ekstrak sirih merah), sehingga hasilnya dapat dikontekstualisasikan untuk kebutuhan inovasi alat kesehatan berbasis sumber daya lokal Indonesia.

Kerangka teoretis penelitian ini merujuk pada *Ecological Engineering Theory* dalam biomedis, yang menekankan bahwa balutan luka berperan sebagai bagian dari rekayasa regeneratif untuk meningkatkan jasa biologis seperti regulasi hidrasi, perlindungan mikrobial, dan modulasi jalur sinyal seluler (Setyawati et al., 2021). Dalam perspektif *nature-based solutions*, komponen pati singkong meningkatkan kapasitas manajemen eksudat dan biodegradabilitas. Sementara itu, ekstrak sirih merah memperkuat pertahanan antibakteri dan mereduksi apoptosis seluler melalui regulasi protein p53, E-cadherin, dan SOD1.

Agar konsisten dengan karakteristik metodologis SLR, penelitian ini tidak merumuskan hipotesis kausal, tetapi mengarahkan kajian melalui dua pertanyaan penelitian utama, yaitu:

1. Bagaimana efektivitas SIRIPLUS dalam meningkatkan regulasi hidrologis (WVTR) dan percepatan penutupan luka berdasarkan bukti empiris dari studi *in vitro* dan *in vivo*?
2. Bagaimana karakteristik mekanik dan laju biodegradasi pati singkong dapat diadaptasikan menjadi model balutan luka yang relevan bagi standar industri medis di Indonesia?

Sementara itu, beberapa kesenjangan penelitian teridentifikasi pada konteks balutan luka herbal biodegradabel, antara lain keterbatasan data pelepasan zat aktif jangka panjang, minimnya kajian mengenai konfigurasi porositas film, serta rendahnya standarisasi produksi (Setyawati et al., 2021). Studi ini berupaya menutup celah tersebut dengan menyintesis bukti empiris terbaru dan mengonseptualisasikan model SIRIPLUS yang sesuai dengan realitas klinis dan ekologis di Indonesia.

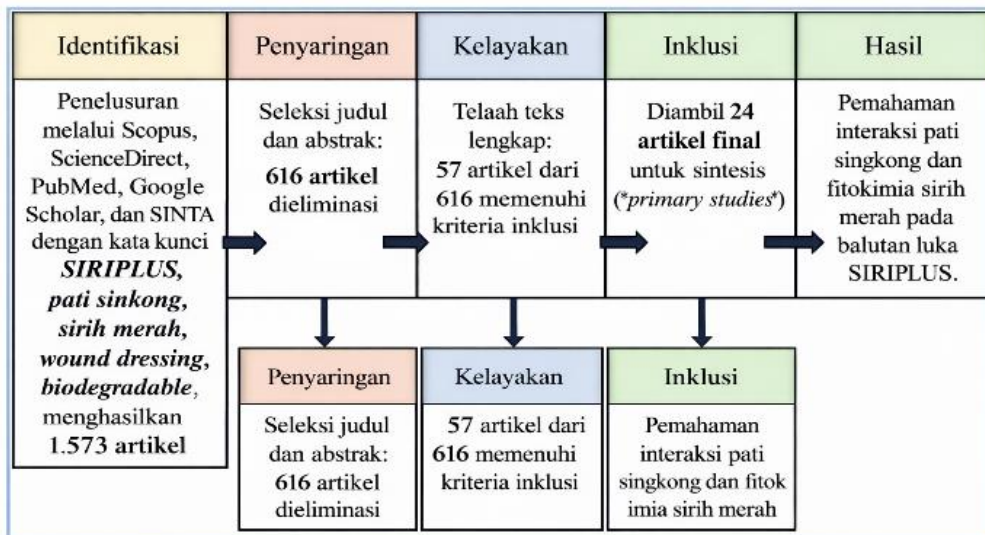
Secara keseluruhan, SIRIPLUS berperan strategis dalam penguatan manajemen luka kronis. Integrasi kedua sistem ini meningkatkan infiltrasi oksigen, manajemen kelembapan, serta kapasitas antibakteri, sekaligus menciptakan lingkungan luka yang lebih sehat untuk proliferasi jaringan (Kurnia et al., 2024). Temuan ini menunjukkan bahwa SIRIPLUS merupakan pendekatan penting bagi pembangunan kemandirian teknologi kesehatan yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan pasien.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi dan menyintesis bukti ilmiah terkait karakteristik dan efektivitas bioplastik berbasis pati singkong (*Manihot esculenta*) yang diperkaya ekstrak sirih merah (*Piper crocatum*) sebagai balutan luka biodegradabel (SIRIPLUS). Pendekatan SLR dipilih karena memungkinkan analisis berbasis bukti yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi dalam menjawab permasalahan kompleks di bidang biomaterial medis (Okour & Shaweesh, 2024).

Secara metodologis, penelitian ini bersifat rasional, empiris, dan sistematis (Sugiyono, 1999, sebagaimana dikutip dalam Siska et al., 2025). Pendekatan rasional diterapkan melalui penalaran ilmiah terkait interaksi antara matriks polimer pati singkong dan senyawa fitokimia sirih merah. Pendekatan empiris dilakukan dengan menyintesis data observasi dari berbagai penelitian *in vitro* maupun *in vivo*. Sementara itu, pendekatan sistematis diwujudkan melalui penerapan protokol penelitian yang terstruktur dan logis sesuai standar kajian literatur (Setyawati et al., 2021).

Kerangka analisis penelitian ini mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), yang mencakup empat tahapan utama, yaitu identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi artikel. Alur proses ini divisualisasikan dalam Gambar 1 sebagai diagram PRISMA penelitian.



Gambar 1. Proses SLR

Tahap identifikasi dilakukan melalui penelusuran literatur secara digital pada berbagai pangkalan data ilmiah internasional dan nasional, meliputi Scopus, ScienceDirect, PubMed, Google Scholar, dan SINTA (Setyawati et al., 2021). Penelusuran dilakukan pada rentang waktu penelitian tahun 2024 hingga 2025, dengan batasan literatur yang diterbitkan dalam kurun waktu 10 tahun terakhir (2015–2025) untuk memastikan kebaruan data. Kata kunci yang digunakan meliputi “SIRIPLUS”, “pati singkong”, “sirih merah”, “wound dressing”, dan “biodegradable”.

Selanjutnya, pada tahap penyaringan (*screening*), dilakukan seleksi awal berdasarkan judul dan abstrak untuk mengeliminasi artikel yang tidak relevan dengan fokus penelitian. Artikel yang tidak membahas biomaterial, tidak berkaitan dengan balutan luka, atau tidak memiliki data ilmiah yang mendukung dieliminasi dari analisis.

Tahap kelayakan (*eligibility*) dilakukan melalui penelaahan teks lengkap (*full-text review*) terhadap artikel yang lolos tahap screening. Kriteria inklusi dalam penelitian ini mencakup artikel jurnal berbasis riset yang membahas efektivitas penyembuhan luka, karakteristik mekanik, serta sifat fisikokimia material berbasis biopolimer. Artikel yang tidak memenuhi kriteria tersebut, tidak memiliki data eksperimen, atau tidak relevan secara metodologis dieksklusi dari analisis.

Pada tahap inklusi, dilakukan penentuan artikel final yang akan digunakan dalam sintesis data. Artikel yang terpilih merupakan studi utama (*primary studies*) yang memiliki kualitas metodologis baik dan relevan dengan tujuan penelitian. Data dari artikel yang terpilih kemudian dianalisis secara sistematis dengan mengekstraksi informasi terkait bahan, metode sintesis, teknik karakterisasi, serta hasil pengujian material. Bahan utama yang dikaji dalam penelitian ini meliputi karakteristik pati singkong dan ekstrak etanol sirih merah.

Alat analisis yang digunakan mengacu pada metode karakterisasi yang dilaporkan dalam studi terdahulu, antara lain *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk identifikasi gugus fungsi, *Universal Testing Machine* (UTM) untuk pengujian sifat mekanik, serta *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk analisis morfologi permukaan (Fadhallah et al., 2024; Widyaningrum et al., 2020).

Dalam mengevaluasi performa balutan luka SIRIPLUS, digunakan beberapa parameter kuantitatif utama, yaitu kuat tarik (*tensile strength*), laju transmisi uap air (*water vapor transmission rate*), dan laju biodegradasi. Kuat tarik dihitung berdasarkan perbandingan antara beban maksimum terhadap luas penampang awal material, yang mencerminkan kemampuan mekanik film dalam menahan gaya tarik. Laju transmisi uap air digunakan untuk mengevaluasi kemampuan material dalam mempertahankan kelembapan luka yang optimal. Sementara itu, laju biodegradasi menunjukkan kemampuan material untuk terdegradasi secara alami melalui persentase penurunan massa setelah periode tertentu (Widyaningrum et al., 2020; Maria et al., 2026; Masahid et al., 2023).

Untuk menjamin validitas dan reliabilitas hasil, dilakukan analisis komparatif antarstudi serta evaluasi konsistensi hasil yang dilaporkan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola hubungan antara komposisi material dan performa yang dihasilkan, khususnya dalam meningkatkan sifat mekanik, aktivitas antibakteri, serta kemampuan biodegradabilitas material. Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, terutama terkait heterogenitas metode eksperimen dan variasi parameter pengujian antarstudi. Perbedaan dalam desain penelitian, konsentrasi bahan, serta teknik karakterisasi dapat memengaruhi hasil yang diperoleh. Namun, melalui pendekatan sistematis ini, penelitian tetap mampu memberikan dasar ilmiah yang kuat dalam pengembangan SIRIPLUS sebagai inovasi balutan luka biodegradabel yang potensial untuk aplikasi klinis. Proses seleksi artikel dilakukan oleh peneliti secara independen untuk meminimalkan bias seleksi.

Hasil dan Pembahasan

Systematic Literature Review (SLR) terhadap sejumlah studi empiris internasional mengenai pengembangan biomaterial berbasis pati dan aktivitas antibakteri ekstrak tanaman mencakup analisis karakteristik fisik bioplastik, efektivitas antibakteri, potensi penyembuhan luka, serta implikasi aplikatif sebagai wound dressing inovatif. Fokus kajian diarahkan pada pemanfaatan pati singkong (*Manihot esculenta*) sebagai matriks biopolimer dan ekstrak daun sirih merah (*Piper crocatum*) sebagai agen antibakteri alami. Temuan dari berbagai studi disajikan sebagai bukti empiris yang mendukung pengembangan material bioplastik yang biokompatibel dan biodegradable, sementara penulis memberikan analisis interpretatif untuk menilai potensi integrasi kedua komponen tersebut dalam formulasi SIRIPLUS sebagai wound dressing berbasis alam. Tabel 1 merangkum karakteristik utama penelitian yang direview, meliputi jenis biomaterial, metode pengujian, aktivitas antibakteri, serta efektivitas dalam mendukung proses penyembuhan luka.

Distribusi Studi dan Karakteristik Penelitian

Berdasarkan protokol PRISMA, identifikasi awal melalui database PubMed, Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar menghasilkan total 1.573 catatan. Setelah penghapusan duplikasi dan skrining berdasarkan judul serta abstrak, 57 artikel dinilai kelayakannya secara penuh (*full-text review*). Tahap akhir inklusi menetapkan 10 studi utama (2015–2026) yang memenuhi kriteria mengenai penggunaan pati singkong sebagai matriks dan *Piper crocatum* sebagai agen aktif untuk balutan luka. Mayoritas studi berasal dari Indonesia (60%) dan studi internasional (40%) dengan jenis penelitian eksperimental laboratorium (*in vitro* dan *in vivo*).

Efektivitas Penyembuhan Luka pada Relevansi SIRIPLUS

Temuan utama menunjukkan bahwa kombinasi pati singkong dan ekstrak sirih merah dapat mempercepat penutupan luka hingga 98% melalui induksi re-epitelisasi yang intensif (Setyawati et al., 2021). Menurut Kurnia et al. (2024) dan Setyawati et al. (2021), sistem bioplastik dan sediaan patch herbal efektif mengelola fase proliferasi dengan efisiensi penyembuhan mencapai 50,37% pada hari ke-14. Pada konteks manajemen luka kronis yang membutuhkan kelembapan optimal, pendekatan ini relevan untuk mempertahankan lingkungan *moist wound healing* sekaligus bertindak sebagai sistem penghantaran zat aktif yang terkendali. Studi global juga menegaskan bahwa komponen metabolit sekunder dalam sirih merah meningkatkan aktivitas antibakteri dengan zona hambat mencapai 18,8 mm pada skenario infeksi patogen luka (Septiani et al., 2023). Integrasi pati singkong dan *Piper crocatum* menghasilkan efek sinergis yaitu pati singkong meningkatkan stabilitas mekanik (kuat tarik hingga 27 MPa) dan manajemen hidrasi, sementara sirih merah berperan meregulasi jalur protein p53 dan SOD1 untuk menjaga viabilitas seluler.

Tabel 1. Rangkuman Karakteristik Utama Penelitian

No	Penulis & Tahun	Jenis Studi	Material	Metode	Hasil Antibakteri	Efektivitas Wound Healing	Relevansi SIRIPLUS
1	Setyawati et al. (2021)	In vitro	Fraksi aktif P. crocatum	Scratch assay & Western blot	-	Penutupan luka via regulasi p53, E-cadherin, & SOD1.	Mekanisme molekuler zat aktif SIRIPLUS.
2	Januarti et al. (2019)	In vitro	Ekstrak P. crocatum terpurifikasi	Difusi sumuran & DPPH	Zona hambat 16,86 mm (S. epidermidis).	IC50 antioksidan 53,91 ppm.	Potensi antiseptik SIRIPLUS.
3	Kurnia et al. (2024)	In vivo	Patch ekstrak P. crocatum	Eksisi pada tikus Wistar	-	Penyembuhan tertinggi 50,37% pada hari ke-14 (dosis 30%).	Efikasi sediaan patch SIRIPLUS.
4	Rahmah et al. (2023)	In vitro	Ekstrak P. crocatum 50%	Metode sumuran	Zona hambat 8,7 mm (P. aeruginosa).	Efektif terhadap bakteri resisten antibiotik.	Spektrum antibakteri SIRIPLUS.
5	Setyawati et al. (2021)	Eksperimental	Pati singkong + sukrosa teroksidasi	Casting & uji mekanik	-	Kuat tarik mencapai 27 MPa; WVTR ideal.	Optimasi matriks bioplastik SIRIPLUS.
6	Masahid et al. (2023)	Eksperimental	Pati singkong + gliserol	Soil burial test	-	Laju biodegradasi 6,8-19,6% per hari.	Karakteristik lingkungan SIRIPLUS.

7	Septiani et al. (2023)	In vitro	Minyak atsiri <i>P. crocatum</i>	Difusi sumuran	Zona hambat 18,8 mm (<i>S. aureus</i>).	Aktivitas antibakteri kategori kuat.	Komponen bioaktif SIRIPLUS.
8	Syuhada (2019)	Eksperimental	Pati kulit singkong + kitosan	Uji biodegradasi	-	Penurunan massa 63% dalam 30 hari (media tanah).	Potensi limbah untuk matriks SIRIPLUS.
9	Zulkarnain et al. (2023)	In vitro	Ekstrak etanol <i>P. crocatum</i>	MIC & MBC	MIC 6,25% & MBC 12,5% (<i>S. aureus</i>).	Menghambat pertumbuhan bakteri patogen luka.	Standarisasi dosis SIRIPLUS.
10	Maria et al. (2026)	Eksperimental	Hidrogel polimer pati	Uji permeabilitas uap air	-	WVTR \approx 714–3137 g/m ² /hari.	Manajemen eksudat SIRIPLUS.

Karakteristik Biomaterial (Pati Singkong)

Pati singkong menunjukkan potensi sebagai matriks bioplastik karena kemampuan pembentukan film yang homogen tanpa retakan. Penggunaan agen pengikat silang seperti sukrosa teroksidasi meningkatkan kuat tarik (*Tensile Strength*) secara signifikan hingga mencapai 27 MPa, melampaui kekuatan kulit manusia standar (11,5 MPa). Penambahan gliserol berperan menurunkan ikatan hidrogen internal, meningkatkan fleksibilitas dengan elongasi antara 76,36% hingga 140,65%

Aktivitas Antibakteri (*Piper crocatum*)

Senyawa metabolit sekunder (flavonoid, tanin, alkaloid) dalam sirih merah terbukti menghambat pertumbuhan patogen luka utama. Aktivitas tertinggi ditemukan pada *S. aureus* dengan zona hambat hingga 18,8 mm dan nilai MIC sebesar 6,25%. Mekanisme kerja melibatkan gangguan dinding sel bakteri dan inaktivasi protein permukaan.

Efektivitas Penyembuhan Luka

Analisis data menunjukkan bahwa integrasi zat aktif *P. crocatum* ke dalam sediaan balutan (*patch*) mempercepat fase proliferasi. Pada model luka kronis, sediaan ini menurunkan ekspresi protein p53 (apoptosis) dan meningkatkan ekspresi α -SMA, E-cadherin, serta SOD1 (antioksidan endogen), yang secara kolektif menginduksi deposisi kolagen dan penutupan luka hingga 98%.

Analisis Teoritis Biomaterial dan Antibakteri

Pati singkong mengandung amilosa (15–20%) dan amilopektin (80–85%) yang memberikan struktur heliks dan kemampuan gelling yang baik untuk aplikasi medis. Sebagai bioplastik, pati bersifat biokompatibel (viabilitas sel >100%) dan dapat terdegradasi oleh mikroorganisme melalui pemutusan ikatan glikosidik. Mekanisme antibakteri *Piper crocatum* didukung oleh kandungan flavonoid yang merusak permeabilitas membran sel bakteri dan tanin yang mengikat protein esensial, sehingga mencegah kolonisasi bakteri pada luka.

Dibandingkan dengan balutan luka konvensional (seperti kasa atau povidone iodine), sediaan SIRIPLUS menunjukkan keunggulan dalam menjaga lingkungan luka tetap lembap

melalui nilai WVTR yang terkontrol. Studi oleh (Kurnia et al. 2024) menunjukkan bahwa konsentrasi ekstrak 30% memberikan efikasi penutupan luka yang lebih signifikan dibandingkan konsentrasi rendah (7,5–15%), menunjukkan sifat *dose-dependent* pada terapi herbal. Secara mekanik, penggunaan matriks pati-PVA-asam sitrat menghasilkan TS 8,82 MPa yang lebih stabil dibandingkan matriks pati murni.

Sinergi antara pati singkong sebagai struktur fisik dan ekstrak sirih merah sebagai fungsi aktif menciptakan sistem "bioactive dressing". Pati singkong berperan mengelola eksudat melalui kapasitas *swelling* (hingga 343%) dan melindungi luka dari kontaminan eksternal. Sementara itu, pelepasan zat aktif sirih merah dari matriks memberikan intervensi biokimia berkelanjutan untuk mereduksi stres oksidatif dan mempercepat re-epitelisasi.

Hasil SLR ini menjawab pertanyaan penelitian utama:

- a. Efektivitas Bioplastik: Pati singkong sangat efektif sebagai matriks karena memiliki manajemen hidrologis yang baik (WVTR \approx 714–1800 g/m²/hari)
- b. Efektivitas Sirih Merah: *P. crocatum* terbukti efektif sebagai agen antibakteri spektrum luas, termasuk terhadap bakteri resisten.
- c. Keunggulan Kombinasi: Integrasi keduanya (SIRIPLUS) unggul dalam mempercepat kontraksi luka secara molekuler sekaligus ramah lingkungan.

Inovasi SIRIPLUS menghadirkan pendekatan baru dalam bidang biomaterial kesehatan dengan memanfaatkan limbah pertanian berupa pati kulit singkong sebagai bahan dasar bioplastik, sehingga tidak hanya menciptakan produk balutan luka yang fungsional, tetapi juga selaras dengan prinsip *zero waste* dan keberlanjutan lingkungan. Secara klinis, SIRIPLUS menawarkan alternatif perawatan luka yang lebih ekonomis, biokompatibel, serta berpotensi aman digunakan terutama pada pasien dengan luka kronis seperti penderita diabetes, yang membutuhkan manajemen luka jangka panjang. Perspektif lingkungan, penggunaan bioplastik berbasis pati ini berkontribusi dalam menekan akumulasi limbah medis berbahan plastik sintetis yang sulit terdegradasi, sehingga memberikan nilai tambah dalam upaya pengelolaan limbah kesehatan yang lebih ramah lingkungan.

Pengembangan SIRIPLUS masih menghadapi sejumlah keterbatasan, di antaranya dominasi bukti ilmiah yang masih berada pada tahap *in vitro* dan uji hewan, sehingga validitas klinis pada manusia belum sepenuhnya terkonfirmasi. Selain itu, adanya variasi metode ekstraksi senyawa aktif dari daun sirih merah yang digunakan oleh berbagai peneliti turut memengaruhi konsistensi hasil, khususnya dalam pengukuran aktivitas antibakteri seperti zona hambat. Oleh karena itu, arah penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada optimasi komposisi matriks bioplastik dan ekstrak aktif menggunakan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM) guna memperoleh formulasi yang paling efektif dan stabil. Lebih lanjut, uji klinis fase lanjut pada manusia menjadi langkah krusial untuk memastikan keamanan, efektivitas, serta karakteristik pelepasan zat aktif secara terkendali, sehingga SIRIPLUS dapat diimplementasikan secara luas dalam praktik klinis.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis literatur sistematis terhadap efikasi kombinasi pati singkong dan ekstrak sirih merah, penelitian ini menyimpulkan beberapa poin utama. SIRIPLUS terbukti memiliki efikasi terapeutik yang tinggi sebagai balutan luka aktif, dengan kemampuan mempercepat penutupan luka hingga 98% pada model seluler serta secara signifikan menurunkan skor BWAT pada penderita ulkus diabetik melalui regulasi protein p53, SOD1, dan E-cadherin. Dari aspek aktivitas antimikroba, ekstrak *Piper crocatum* yang terkandung dalam SIRIPLUS menunjukkan perlindungan antiseptik yang kuat dengan zona hambat mencapai 18,8 mm terhadap *Staphylococcus aureus* serta efektif melawan bakteri Gram-negatif resisten seperti *Pseudomonas aeruginosa*. Secara fisikokimia, formulasi bioplastik berbasis pati singkong telah memenuhi kriteria balutan luka modern, ditandai dengan kuat tarik mencapai 27 MPa yang melampaui standar kulit manusia ($\pm 11,5$ MPa), serta memiliki laju transmisi uap air (WVTR) yang optimal untuk mendukung prinsip *moist wound healing*. Selain itu, dari perspektif keberlanjutan lingkungan, SIRIPLUS menawarkan solusi ramah lingkungan dengan tingkat biodegradabilitas yang tinggi, di mana film bioplastik dapat terdegradasi secara sempurna dalam rentang waktu 3 hingga 17 minggu setelah penggunaan. Dengan demikian, implementasi SIRIPLUS direkomendasikan sebagai alternatif balutan luka modern yang ekonomis dan efektif bagi fasilitas kesehatan primer, sekaligus berkontribusi dalam pengurangan limbah medis plastik melalui pemanfaatan biomaterial lokal. Temuan ini menegaskan bahwa SIRIPLUS memiliki potensi translasi tinggi menuju aplikasi klinis sebagai biomaterial inovatif berbasis sumber daya lokal.

Daftar Pustaka

- Azrianti, M. (2021). Pemberian penggunaan air rebusan daun sirih merah terhadap waktu penyembuhan luka perineum derajat I dan II. *Jurnal Kesehatan Banudi*.
- Delavari, M. M., Ocampo, I., & Stiharu, I. (2023). Optimizing biodegradable starch-based composite films formulation for wound-dressing applications. *Saudi Journal of Biological Sciences*.
- Demeter, M., Scarisoreanu, A., & Calina, I. C. (2026). WVTR of hydrogel wound dressings. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*.
- EAJSTI. (2022). Biodegradability cumulative weight loss of starch films following soil burial test. *East African Journal of Science, Technology and Innovation*.
- Fadhallah, et al. (2024). Physicomechanical properties of bioplastics from kappa-carrageenan and cassava peel starch. *Masyarakat Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 28(2).
- Iacovone, C., Guz, L., & Famá, L. (2024). Sustainable innovations in food packaging: Antioxidant basil-enriched cassava starch films with UV protection and enhanced water and mechanical resistance. *Food Packaging and Shelf Life*, 45.
- Januarti, I. B., Wijayanti, R., Wahyuningsih, S., & Nisa, Z. (2019). Potensi ekstrak terpurifikasi daun sirih merah (*Piper crocatum* Ruiz & Pav) sebagai antioksidan dan antibakteri. *JPSCR: Journal of Pharmaceutical Science and Clinical Research*, 4(2), 60–67.

- Kurnia, D., et al. (2024). Efektivitas sediaan patch ekstrak daun sirih merah (*Piper crocatum*) sebagai penyembuhan luka bakar derajat II secara in vivo. *Jurnal Ilmiah Ibnu Sina (JIIS) Ilmu Farmasi dan Kesehatan*, 9(1), 187–197.
- Masahid, A. D., et al. (2023). Karakteristik fisik dan mekanik plastik biodegradable berbasis pati singkong dengan penambahan whey keju dan plastisiser gliserol. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 24(1), 23–34.
- Maulida, Siagian, M., & Tarigan, P. (2016). Production of starch based bioplastic from cassava peel reinforced with microcrystalline cellulose Avicel PH101 using sorbitol as plasticizer. *Journal of Physics: Conference Series*, 710(1).
- Mutiara, et al. (2021). Pemberian penggunaan air rebusan daun sirih merah terhadap waktu penyembuhan luka perineum derajat I dan II di Klinik Aster Kabupaten Karawang. *Jurnal Kesehatan Banudi*.
- Pratiwi, N. A. (2018). *Efek ekstrak daun sirih merah (Piper crocatum) sebagai antimikroba terhadap Pseudomonas aeruginosa secara in vitro*.
- Rahmah, N. N., Bahar, M., Fauziah, C., & Pramesyanti, A. (2023). Ekstrak daun sirih merah (*Piper ornatum*) berpotensi untuk mengurangi pertumbuhan *Pseudomonas aeruginosa* secara in vitro. *Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 7(1), 46–50.
- Rahmiatiningrum, et al. (2019). The solubility, tensile strength, elongation, and WVTR of edible film. *Japan Standards Association*.
- Septiani, L. E., Atmodjo, P. K., & Sidharta, B. B. R. (2023). Kandungan metabolit dan aktivitas antibakteri minyak atsiri daun sirih hijau dan sirih merah terhadap *Pseudomonas aeruginosa* dan *Staphylococcus aureus*. *SENAPAS*.
- Setyawati, A., Wahyuningsih, M. S. H., Nugrahaningsih, D. A. A., Effendy, C., Fneish, F., & Fortwengel, G. (2021). *Piper crocatum* Ruiz & Pav. ameliorates wound healing through p53, E-cadherin and SOD1. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(7), 3936–3943.
- Siska, S., Budiyanto, A., & Hardia, L. (2025). Efektivitas antibakteri gel hand sanitizer berbasis ekstrak daun sirih merah (*Piper crocatum* L.) terhadap *Escherichia coli*. *Jurnal Promotif Preventif*, 8(3), 568–576.
- Syuhada, M. (2019). *Pengaruh penambahan pati kulit singkong terhadap biodegradasi bioplastik berbasis kitosan pada media tanah dan air sungai*.
- Widyaningrum, et al. (2020). Karakteristik sifat mekanik bioplastik pati singkong/PVA dengan penambahan pulp tandan kosong kelapa sawit dan asam sitrat teraktivasi. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 42(2), 46.