

Penerapan Teknologi Plasma dalam Bidang Teknologi Sediaan Farmasi: *Review Jurnal*

Mohammad Rifat *, Gita Cahya Eka Darma

Prodi Farmasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam Bandung, Indonesia.

Mohammadrifat50@gmail.com, g.c.ekadarma@unisba.ac.id

Abstract. The development of plasma technology, particularly cold plasma, has provided significant innovations in the field of pharmaceutical formulation technology. This technology can modify the surface of drug substances without damaging their internal structure, thereby improving physicochemical properties such as solubility, adhesion, and bioavailability of active ingredients. Furthermore, plasma is also used as an effective, safe, and environmentally friendly non-thermal sterilization method, particularly for heat-sensitive active ingredients. This literature review reviews various studies related to the application of plasma technology in surface modification of drug dosage forms, enhancing bioavailability, and heat-free sterilization. The results indicate that plasma technology can improve the performance of drug formulations through the transformation of crystalline to amorphous forms and particle surface engineering, which contributes to more optimal release of active ingredients and increased therapeutic efficacy. However, challenges in process standardization, production scalability, and long-term safety must be addressed for this technology to be widely implemented in the pharmaceutical industry. Therefore, multidisciplinary collaboration and adaptive regulatory development are essential to support the application of plasma technology as an innovative solution in the development of modern pharmaceutical dosage forms.

Keywords: *Plasma technology, pharmaceutical dosage forms, cold plasma*

Abstrak. Perkembangan teknologi plasma, khususnya cold plasma, memberikan inovasi signifikan dalam bidang teknologi sediaan farmasi. Teknologi ini mampu memodifikasi permukaan bahan obat tanpa merusak struktur internalnya, sehingga meningkatkan sifat fisikokimia seperti kelarutan, adhesi, dan bioavailabilitas zat aktif. Selain itu, plasma juga digunakan sebagai metode sterilisasi non-termal yang efektif, aman, dan ramah lingkungan, khususnya untuk bahan aktif yang sensitif terhadap panas. Kajian literatur ini meninjau berbagai studi terkait penerapan teknologi plasma dalam modifikasi permukaan sediaan obat, peningkatan bioavailabilitas, dan sterilisasi tanpa panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi plasma mampu meningkatkan performa formulasi obat melalui perubahan bentuk kristal menjadi amorf dan rekayasa permukaan partikel, yang berkontribusi pada pelepasan zat aktif yang lebih optimal dan peningkatan efektivitas terapi. Namun, terdapat tantangan dalam standarisasi proses, skalabilitas produksi, serta keamanan jangka panjang yang perlu diatasi agar teknologi ini dapat diimplementasikan secara luas di industri farmasi. Oleh karena itu, kolaborasi multidisipliner dan pengembangan regulasi yang adaptif sangat diperlukan untuk mendukung penerapan teknologi plasma sebagai solusi inovatif dalam pengembangan sediaan farmasi modern.

Kata Kunci: Teknologi plasma, sediaan farmasi, cold plasma.

A. Pendahuluan

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang farmasi telah mengalami kemajuan pesat dalam dua dekade terakhir. Peningkatan ini mencakup berbagai aspek, mulai dari penemuan senyawa aktif baru, teknik sintesis yang lebih efisien, hingga pendekatan formulasi yang lebih inovatif. (Yosi Siti Solihah & Fikri Hidayat, 2022) Salah satu area yang menjadi fokus utama adalah peningkatan efektivitas sediaan farmasi melalui optimalisasi bentuk sediaan, bioavailabilitas, stabilitas, dan metode penghantaran obat yang lebih canggih. Munculnya kebutuhan akan sediaan yang lebih aman, efektif, dan sesuai dengan kebutuhan pasien mendorong para ilmuwan untuk mengeksplorasi teknologi lintas disiplin, salah satunya adalah teknologi plasma. Di tengah tantangan formulasi obat modern yang kompleks, teknologi plasma menawarkan potensi solusi yang menarik dan relatif belum banyak dieksplorasi secara luas dalam industri farmasi.

Plasma, sering disebut sebagai “keadaan materi keempat”, merupakan campuran kompleks dari ion, elektron, molekul netral, serta spesies reaktif yang memiliki energi tinggi. Plasma dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu plasma termal dan plasma non-termal atau plasma dingin (*cold plasma*). (Utami et al., n.d.) Dalam konteks aplikasi farmasi, plasma dingin lebih banyak digunakan karena kemampuannya menghasilkan spesies reaktif pada suhu rendah yang aman bagi material biologis dan zat aktif obat yang umumnya sensitif terhadap panas. Cold plasma dihasilkan dari berbagai sumber, seperti *dielectric barrier discharge (DBD)*, *radio frequency (RF) plasma*, dan *glow discharge*, yang memungkinkan aplikasi fleksibel dalam modifikasi permukaan, sterilisasi, maupun pengembangan sistem penghantaran obat berbasis nanoteknologi (Darma, 2022).

Salah satu keunggulan utama teknologi plasma dalam formulasi farmasi adalah kemampuannya untuk memodifikasi permukaan bahan aktif maupun eksipien tanpa merusak struktur internalnya. Dengan paparan plasma, permukaan partikel dapat diubah karakteristiknya—misalnya menjadi lebih hidrofilik, meningkatkan adhesi, atau bahkan menghasilkan permukaan bermuatan tertentu yang sesuai dengan target terapi. Hal ini sangat berguna terutama untuk zat aktif dengan kelarutan rendah (BCS class II dan IV), karena perubahan sifat permukaan dapat meningkatkan disolusi dan pada akhirnya meningkatkan bioavailabilitas. Bahkan dalam beberapa kasus, penggunaan plasma telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi terapi hingga dua kali lipat dibandingkan dengan metode konvensional (Syukri, 2018).

Di sisi lain, teknologi plasma juga menawarkan solusi untuk permasalahan sterilisasi dalam proses produksi sediaan farmasi. Prosedur sterilisasi konvensional seperti autoklaf atau penggunaan radiasi gamma tidak selalu dapat digunakan untuk sediaan yang mengandung bahan sensitif terhadap panas dan radiasi (apt. Andi Ifriany Harun, S.Si. et al., 2025). Cold plasma menyediakan alternatif proses sterilisasi yang bersifat non-termal dan ramah lingkungan. Mekanisme kerja plasma dalam inaktivasi mikroorganisme melibatkan kerusakan membran sel, oksidasi DNA, dan gangguan metabolisme melalui pembentukan *reactive oxygen species (ROS)* dan *reactive nitrogen species (RNS)*. Ini menjadikannya metode yang sangat efektif, bahkan terhadap mikroorganisme resisten, tanpa meninggalkan residu berbahaya (Shafa Savira Vaditya & Gita Cahya Eka Darma, 2023).

Lebih jauh lagi, aplikasi plasma juga merambah pada pengembangan sistem penghantaran obat berbasis polimer, seperti film, mikrosfer, dan nanopartikel. Permukaan polimer yang telah dimodifikasi plasma dapat meningkatkan interaksi dengan jaringan biologis atau bahkan digunakan untuk pencapaian target terapi spesifik melalui konjugasi dengan ligan tertentu. Penggunaan plasma juga memungkinkan peningkatan stabilitas bahan aktif terhadap degradasi oksidatif atau enzimatis, serta pengaturan profil pelepasan obat (*controlled release*) yang lebih baik. Kemampuan ini sangat penting dalam pengembangan obat-obatan untuk terapi jangka panjang, penyakit kronis, maupun terapi kanker yang memerlukan pengiriman zat aktif secara terfokus ke sel target (Martien et al., 2021).

Beberapa studi eksperimental telah menunjukkan keberhasilan penggunaan teknologi plasma dalam mengatasi permasalahan klasik sediaan farmasi. Misalnya, penelitian oleh Rezaei et al. (2021) menunjukkan bahwa perlakuan plasma pada partikel simvastatin dapat meningkatkan kelarutannya secara signifikan. Studi lain oleh Bhatt dan Pathak (2019)

menunjukkan bahwa aplikasi plasma pada tablet ibuprofen menghasilkan peningkatan laju disolusi hingga 45%. Di sisi sterilisasi, plasma telah digunakan secara efektif untuk sterilisasi alat kesehatan, vial, dan bahkan bahan kemasan tanpa merusak sifat fungsionalnya. Fakta ini menunjukkan bahwa teknologi plasma tidak hanya memiliki potensi teoritis, tetapi juga aplikatif dalam skala produksi farmasi.

Namun demikian, meskipun memiliki banyak keunggulan, penerapan teknologi plasma dalam industri farmasi masih menghadapi sejumlah tantangan. Salah satunya adalah aspek skalabilitas dan konsistensi hasil dalam skala produksi massal. Teknologi plasma masih relatif baru di bidang farmasi dan belum banyak tersedia perangkat standar yang sesuai dengan kebutuhan industri. Selain itu, diperlukan validasi ilmiah dan regulasi yang ketat untuk memastikan keamanan penggunaan plasma, terutama untuk produk yang dikonsumsi langsung oleh manusia. Tantangan lain adalah terbatasnya pemahaman tentang interaksi jangka panjang antara permukaan hasil perlakuan plasma dengan lingkungan biologis atau komponen lain dalam formulasi.

Di tengah tantangan tersebut, peluang riset dan inovasi dalam penerapan teknologi plasma dalam formulasi farmasi tetap terbuka lebar. Tren global yang mengarah pada terapi presisi, personalisasi obat, dan pengurangan penggunaan bahan kimia sintetis mendukung adopsi teknologi alternatif seperti plasma. Selain itu, meningkatnya permintaan terhadap sediaan steril yang efisien dan ramah lingkungan menjadikan plasma sebagai teknologi strategis dalam jangka panjang. Beberapa negara maju telah mulai mengembangkan prototipe alat plasma untuk aplikasi farmasi, dan kolaborasi antara akademisi, industri, serta regulator akan sangat penting untuk mempercepat translasi teknologi ini ke dalam praktik industri yang lebih luas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perlu dilakukan kajian pustaka yang komprehensif untuk menggali lebih dalam mengenai potensi, manfaat, serta tantangan penerapan teknologi plasma dalam bidang teknologi sediaan farmasi. Kajian ini bertujuan untuk merangkum berbagai hasil penelitian terbaru, memberikan analisis kritis terhadap efektivitas teknologi ini, serta menawarkan perspektif mengenai pengembangan ke depan yang dapat menjadi dasar bagi riset lanjutan maupun penerapan teknologi plasma di tingkat industri farmasi.

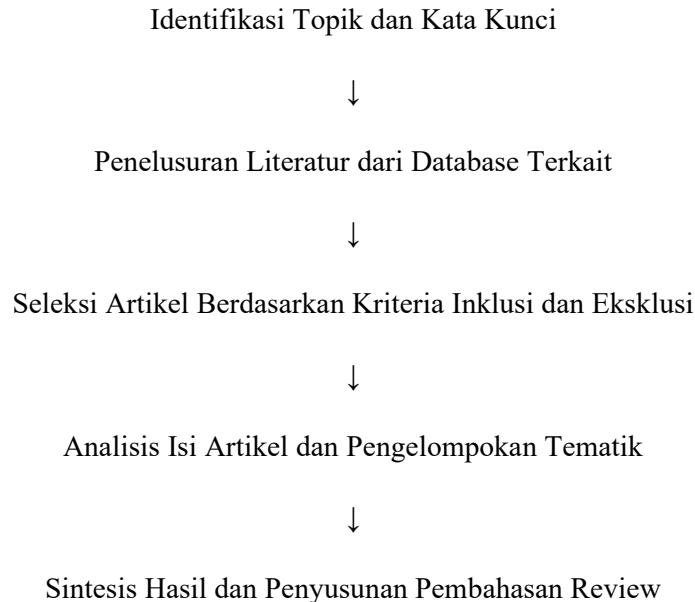
B. Metode

Studi ini merupakan kajian literatur sistematis yang bertujuan untuk menelaah dan menganalisis berbagai hasil penelitian terkait penerapan teknologi plasma dalam bidang teknologi sediaan farmasi. Kajian dilakukan dengan mengumpulkan artikel ilmiah dari berbagai database terpercaya seperti PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, dan Google Scholar. Pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci seperti “plasma technology in pharmaceuticals”, “cold plasma drug formulation”, “plasma-assisted drug delivery”, dan “plasma for pharmaceutical sterilization”. Pemilihan kata kunci disesuaikan agar mencakup berbagai aspek penggunaan teknologi plasma, mulai dari modifikasi permukaan bahan obat hingga proses sterilisasi non-termal.

Proses seleksi artikel dilakukan dengan menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi. Artikel yang dimasukkan dalam kajian ini dipilih berdasarkan beberapa kriteria: (1) diterbitkan dalam kurun waktu 2015–2025; (2) ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia; (3) merupakan artikel penelitian asli, review ilmiah, atau laporan teknis yang berfokus pada penggunaan teknologi plasma dalam pengembangan sediaan farmasi; dan (4) tersedia dalam versi teks lengkap dan melalui proses peer-review. Sementara itu, artikel yang tidak relevan dengan topik (misalnya penggunaan plasma dalam industri pangan atau tekstil), tidak tersedia secara lengkap, atau memiliki kualitas metodologi yang meragukan dikeluarkan dari proses analisis.

Setelah dilakukan proses seleksi, artikel yang memenuhi kriteria dianalisis lebih lanjut untuk mengevaluasi berbagai pendekatan, hasil temuan, serta manfaat dan tantangan penggunaan teknologi plasma dalam formulasi farmasi. Analisis dilakukan dengan mengelompokkan artikel berdasarkan tema aplikasi, seperti modifikasi permukaan bahan obat, peningkatan bioavailabilitas, pengembangan sistem penghantaran obat, dan sterilisasi tanpa panas. Hasil analisis kemudian disintesis menjadi sebuah narasi ilmiah yang komprehensif dan kritis, guna memberikan gambaran yang utuh tentang peran teknologi plasma dalam inovasi

sediaan farmasi modern.



Gambar 1. Alur Kajian Literatur Sistematis

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Plasma dalam Modifikasi Permukaan Sediaan Obat

Modifikasi permukaan sediaan obat menggunakan teknologi plasma—terutama cold plasma—terbukti efektif meningkatkan sifat-fisik seperti kelarutan, adhesi, dan daya rekat antarpartikel. Proses ini memanfaatkan plasma oksigen atau argon untuk memperkenalkan gugus fungsi (seperti $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$) di permukaan partikel, yang memicu peningkatan hidrofilisitas dan interaksi dengan eksipien atau jaringan biologis. Modifikasi ini tidak mengubah struktur internal bahan, sehingga tetap mempertahankan sifat mekanik dan stabilitas zat aktif. Hal ini juga memungkinkan dispersibilitas dan adesi lebih optimal dalam formulasi seperti tablet atau film farmasi (Oguzlu et al., 2024)

Penelitian pada sediaan padat seperti tablet ibuprofen dan simvastatin menunjukkan peningkatan signifikan dalam laju disolusi setelah perlakuan plasma oksigen. Dengan sifat permukaan yang lebih hidrofilik dan porositas yang meningkat, penetrasi cairan tubuh menjadi lebih cepat dan pelepasan zat aktif meningkat. Tak hanya itu, plasma juga dapat membersihkan kontaminan permukaan dan menurunkan energi antarmuka partikel, yang semakin meningkatkan efisiensi disolusi.

Dalam nanopartikel atau mikrosfer, teknologi plasma digunakan untuk mengatur muatan permukaan atau menambahkan ligan target. Studi pada sistem PLGA menunjukkan bahwa plasma oksigen memperbaiki karakteristik pelepasan obat secara berkelanjutan selama puluhan hari, bahkan meningkatkan kompatibilitas biologis serta adhesi sel di sekitarnya. Modifikasi ini sangat berguna dalam sistem penghantaran obat bertarget, di mana interaksi permukaan menjadi kritis.

Selain itu, efek roughening (peningkatan kekasaran permukaan) yang dihasilkan plasma

memberikan peningkatan area permukaan aktif. Para peneliti menemukan bahwa permukaan partikel menjadi lebih kasar dan kontak sudut menurun, meningkatkan kemampuan adhesi dan disolusi. Roughness ini juga mendukung adsorpsi obat lebih tinggi dan pelepasan yang lebih terkendali

Walaupun demikian, implementasi plasma untuk aplikasi industri menuntut pengendalian parameter yang sangat presisi, seperti jenis plasma, gas, daya, tekanan, dan durasi paparan. Variasi dalam parameter ini dapat menyebabkan hasil yang tidak konsisten, sehingga diperlukan perangkat produksi yang terstandarisasi untuk menjamin reproducibility dan keamanan produk akhir

Plasma dalam Peningkatan Bioavailabilitas

Bioavailabilitas merupakan tantangan utama dalam formulasi obat, khususnya untuk obat lipofilik (BCS kelas II dan IV). Cold plasma terbukti mampu mengubah struktur kristalin zat aktif menjadi bentuk amorf—sehingga kelarutan meningkat—tanpa memerlukan pelarut atau eksipien tambahan. Sebagai contoh, studi Rezaei et al. (2021) menemukan bahwa perlakuan plasma pada simvastatin menghasilkan peningkatan kelarutan hingga tiga kali lipat (Tungadi, 2020).

Lebih jauh, plasma memungkinkan rekayasa ukuran partikel melalui fragmentasi mikro—menghasilkan partikel berukuran lebih kecil dengan luas permukaan lebih besar. Efek ini tidak hanya merangsang disolusi lebih cepat namun juga mempercepat absorpsi di dalam tubuh. Kombinasi struktur amorf dan ukuran partikel yang optimal menghasilkan peningkatan respon terapi dan potensi pengurangan dosis (Schmidt et al., 2022).

Selain itu, plasma juga memperbaiki permeabilitas ke membran biologis seperti epitel usus atau kulit. Dengan menambahkan gugus fungsional polar, partikel menjadi lebih kompatibel secara elektrostatis dengan membran biologis, meningkatkan penetrasi obat. Beberapa penelitian menunjukkan penetrasi meningkat hingga 2–3 kali lipat dibandingkan partikel non-modifikasi

Aplikasi pada mikro- dan nanopolimer alami seperti chitosan, PLGA, atau alginat juga telah menunjukkan efek pH-responsif dalam sistem penghantaran obat—memungkinkan pelepasan sistematis di lingkungan spesifik, misalnya pada jaringan tumor dengan pH rendah. Modifikasi plasma pada nanopartikel chitosan memperlambat pelepasan pada pH fisiologis (7.4) dan mempercepat pada pH tumor (5.0) sehingga sangat berguna dalam terapi bertarget

Namun, stabilitas bentuk amorf tetap menjadi perhatian utama. Bentuk non-kristalin rentan kembali ke bentuk kristal saat penyimpanan—memerlukan strategi stabilisasi seperti pemakaian matriks polimer atau penyimpanan dalam suhu terkontrol. Tanpa pengendalian, peningkatan kelarutan yang diperoleh bisa mereda seiring waktu

Plasma untuk Sterilisasi Tanpa Panas

Sterilisasi merupakan tahap krusial dalam produksi sediaan farmasi. Metode tradisional seperti autoklaf atau radiasi dapat merusak bahan aktif sensitif. Teknologi cold plasma muncul sebagai alternatif sterilisasi non-termal yang memadukan efektivitas mikroba tinggi dan keamanan bahan. Plasma bekerja pada suhu rendah ($<40^{\circ}\text{C}$), sehingga cocok untuk vaksin, protein, dan formulasi biologis sensitive (Muliyah et al., 2020).

Mekanisme sterilisasi plasma melibatkan produksi reactive oxygen species (ROS) dan reactive nitrogen species (RNS) yang merusak mikroorganisme melalui oksidasi membran sel, protein, dan DNA. Efektivitasnya sudah terbukti pada bakteri gram positif/negatif, spora, dan beberapa virus. Contoh aplikasinya termasuk sterilisasi masker FFP3 yang berhasil menurunkan populasi *E. coli* hingga lebih dari 5-log hanya dalam beberapa menit paparan plasma

Teknologi ini juga efektif untuk sterilisasi kemasan, vial, jarum suntik, dan alat produksi farmasi. Keunggulannya tidak meninggalkan residu berbahaya seperti etilen oksida; serta bisa diintegrasikan ke dalam garis produksi otomatis (*in-line sterilization*). Selain itu, plasma mampu menjangkau area permukaan yang sulit dijangkau metode fisik konvensional

Namun, efektivitas sterilisasi sangat tergantung pada konfigurasi sistem, jenis gas, daya, dan durasi paparan. Parameter yang tidak tepat dapat mengurangi efisiensi atau bahkan merusak sifat bahan. Oleh karena itu, perlu dilakukan validasi ketat sesuai pedoman Good Manufacturing Practice (GMP) dan regulasi farmasi terkait sebelum penerapan secara komersial

Penggunaan teknologi ini dalam industri farmasi masih relatif terbatas, namun beberapa

laboratorium dan perusahaan sudah mulai mengadopsi plasma dalam sterilisasi alat kesehatan dan kemasan. Dengan pengembangan perangkat industri dan regulasi yang jelas, cold plasma dapat menjadi metode sterilisasi standar di masa depan yang efisien, aman, dan ramah lingkungan.

Tantangan dan Peluang Pengembangan

Walaupun hasil studi menunjukkan potensi besar dari teknologi plasma dalam formulasi farmasi, terdapat sejumlah tantangan signifikan yang perlu diatasi agar teknologi ini bisa diterapkan secara luas dalam skala industri. Tantangan utama adalah **belum adanya standardisasi operasional dan regulasi yang jelas** untuk penggunaan plasma dalam produksi farmasi. Banyak penelitian masih dilakukan di laboratorium, sementara perangkat industri yang valid belum tersedia secara komersial (Muthiadin, 2024).

Selain itu, skalabilitas menjadi hambatan utama. Banyak hasil penelitian berbasis skala kecil atau pilot. Pengembangan teknologi plasma untuk produksi massal membutuhkan desain peralatan yang konsisten dan terstandarisasi—baik dalam hal konfigurasi gas, daya, maupun kontrol lingkungan—agar hasilnya reproducible dan aman secara industri.

Kurangnya data toksikologi jangka panjang juga menjadi perhatian penting. Interaksi antara permukaan hasil modifikasi plasma dengan komponen tubuh serta kemungkinan munculnya senyawa baru selama proses pemrosesan perlu diteliti lebih lanjut. Data farmakokinetik dan farmakodinamik yang memadai sangat dibutuhkan untuk menjamin keamanan konsumen.

Namun demikian, peluang pengembangan sangat terbuka, terutama dalam tren global menuju terapi presisi dan sediaan farmasi pintar (*smart drug delivery systems*). Integrasi plasma dengan nanoteknologi atau sistem biomolekuler dapat memicu inovasi sediaan bertarget, responsif pH, dan sistem kontrol pelepasan obat yang canggih.

Untuk mempercepat adopsi teknologi ini, perlu kolaborasi multidisipliner antara peneliti, industri, regulator, dan penyedia teknologi. Dukungan riset terapan, pengembangan perangkat yang sesuai, serta pembentukan regulasi adaptif merupakan kunci agar teknologi plasma dapat memberikan sumbangan besar terhadap inovasi sediaan farmasi di masa depan.

Analisis dan Pembahasan

Penerapan teknologi plasma dalam bidang teknologi sediaan farmasi menunjukkan potensi signifikan dalam mendukung peningkatan mutu, efektivitas, dan efisiensi formulasi obat modern. Salah satu kontribusi utama teknologi ini adalah dalam proses modifikasi permukaan bahan obat yang memungkinkan peningkatan sifat fisikokimia seperti kelarutan, adhesi, dan keterbasahan. Teknologi cold plasma memungkinkan perubahan hanya pada permukaan partikel tanpa memengaruhi struktur internal, sehingga sangat sesuai digunakan untuk bahan-bahan yang rentan terhadap suhu tinggi atau paparan bahan kimia keras. Hal ini menjadi solusi alternatif yang ramah terhadap bahan aktif sensitif dan relevan dalam pengembangan sediaan obat canggih, seperti nanopartikel, mikrosfer, dan film pelapis obat (Hayati et al., 2025).

Selain itu, peningkatan bioavailabilitas melalui modifikasi struktur kristal dan rekayasa permukaan menjadi salah satu keunggulan penting. Transformasi zat aktif dari bentuk kristalin ke amorf secara non-termal membuka peluang besar bagi formulasi obat yang sebelumnya memiliki keterbatasan dalam pelarutan dan absorpsi sistemik. Namun, transformasi ini juga menimbulkan tantangan dalam hal stabilitas bentuk amorf yang rentan mengalami rekristalisasi selama penyimpanan. Oleh karena itu, meskipun cold plasma sangat menjanjikan untuk meningkatkan efektivitas biofarmasetik, formulasi lanjutan dengan strategi stabilisasi tetap dibutuhkan. Penerapan teknologi ini dalam bentuk kombinasi dengan eksipien stabilizer atau pembawa nanopartikel perlu terus dikembangkan dalam riset lanjutan.

Di sisi lain, penggunaan plasma untuk sterilisasi sediaan farmasi memberikan keunggulan utama dalam hal keamanan bahan. Proses sterilisasi tanpa panas ini membuka jalan bagi produksi obat-obatan biologis, protein terapeutik, dan vaksin yang tidak tahan terhadap suhu tinggi. Efektivitasnya terhadap mikroorganisme telah dibuktikan dalam berbagai studi, namun tantangan dalam hal validasi proses, efisiensi energi, serta kesesuaian dengan standar regulasi tetap menjadi perhatian. Implementasi teknologi ini dalam industri farmasi membutuhkan pengembangan peralatan produksi yang presisi, validasi GMP yang ketat, serta penyusunan regulasi teknis yang jelas. Dengan pendekatan lintas disiplin dan sinergi antara riset akademik

dan dunia industri, tantangan-tantangan tersebut dapat diatasi, membuka peluang besar untuk industrialisasi teknologi plasma dalam skala komersial.

D. Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa teknologi plasma, khususnya **cold plasma**, memiliki potensi besar dalam meningkatkan kualitas dan performa sediaan farmasi. Aplikasinya mencakup modifikasi permukaan bahan obat untuk meningkatkan kelarutan, daya adhesi, serta efisiensi penghantaran obat. Keunggulan ini sangat relevan untuk pengembangan sediaan padat, sediaan lepas terkendali, maupun sistem nanopartikel. Selain itu, kemampuan plasma dalam memodifikasi sifat permukaan tanpa merusak struktur bahan aktif menjadikannya sangat kompatibel untuk bahan yang sensitif terhadap suhu atau bahan kimia.

Penerapan teknologi plasma juga berkontribusi besar dalam peningkatan bioavailabilitas zat aktif, terutama bagi obat-obatan dengan kelarutan rendah. Transformasi bentuk kristal menjadi amorf serta peningkatan permeabilitas membran biologis menunjukkan efisiensi yang menjanjikan dalam peningkatan efektivitas terapi. Namun demikian, tantangan dalam menjaga stabilitas bentuk amorf dan memastikan keamanan pemrosesan tetap menjadi area penting untuk pengembangan ke depan. Oleh karena itu, teknologi plasma sebaiknya tidak berdiri sendiri, melainkan diintegrasikan dengan strategi formulasi lain guna menjamin stabilitas dan keamanan sediaan.

Dari aspek sterilisasi, cold plasma menawarkan metode sterilisasi non-termal yang sangat sesuai untuk produk farmasi sensitif, termasuk vaksin dan sediaan biologis. Keefektifannya dalam membunuh mikroorganisme tanpa meninggalkan residu berbahaya menjadi nilai tambah yang besar. Walau demikian, untuk dapat diterapkan dalam skala industri, diperlukan upaya lebih lanjut dalam standarisasi proses, validasi efektivitas, serta pengembangan alat plasma yang sesuai dengan skala produksi farmasi. Jika tantangan tersebut dapat diatasi, maka teknologi plasma berpotensi menjadi pilar baru dalam inovasi sediaan farmasi modern yang lebih efisien, efektif, dan aman.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan artikel ini. Terutama kepada dosen pembimbing dan sivitas akademika di Program Studi Farmasi, Fakultas MIPA, Universitas Islam Bandung, yang telah memberikan arahan, masukan ilmiah, serta motivasi selama proses penulisan.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan sejawat dan peneliti yang telah memberikan referensi dan diskusi yang konstruktif dalam memahami lebih dalam mengenai penerapan teknologi plasma di bidang sediaan farmasi. Tanpa kerja sama dan pertukaran ide tersebut, artikel ini tidak dapat tersusun dengan baik.

Akhir kata, penulis juga menghargai kontribusi dari seluruh penulis dan peneliti dalam artikel-artikel yang dijadikan bahan kajian dalam studi ini. Semoga artikel ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi bagi pengembangan riset lebih lanjut di bidang teknologi farmasi, khususnya terkait pemanfaatan teknologi plasma dalam inovasi formulasi obat.

Daftar Pustaka

apt. Andi Ifriany Harun, S.Si., M. Si., Dr. Maswati Baharuddin, S.Si., M. Si., Etha Marista, S.Si., M. Si., Mahyarudin, S.Si., M. Si., apt. Imanda Dyah Rahmadani, S.Farm., M. Farm., apt. Reni Yustiati Saksono, S.Si., M. Sc., apt. Mahdalena Sy Pakaya, S.Farm., M. Si., apt. Muhtaromah, S.Si., Sp. FRS., & Dr. apt. Muntasir. S.Si., M. Si. (2025). *MIKROBIOLOGI FARMASI*.

Darma, G. C. E. (2022). Farmasi Plasma. *Jurnal Ilmiah Farmasi Farmasyifa*, 5(1), 20–32. <https://doi.org/10.29313/jiff.v5i1.8846>

- Hayati, R., Sari, R. I. P., & Merwanta, S. (2025). *Inovasi Formulasi Farmasi Nanoteknologi dan Bahan Herbal*.
- Martien, R., Adhyatmika, Irianto, I. D. K., Farida, V., & Sari, D. P. (2021). Technology Developments Nanoparticles as Drug. *Majalah Farmaseutik*, 8(1), 133–144.
- Muliyah, P., Aminatun, D., Nasution, S. S., Hastomo, T., & Setiana Sri Wahyuni Sitepu, T. (2020). Teknologi Pengolahan Pangan Herbal. In *Journal GEEJ* (Vol. 7, Issue 2).
- Muthiadin, C. (2024). *Jejak Patogen: dari Postulat Koch Menuju Benteng Imun*.
- Oguzlu, H., Baldelli, A., Mohammadi, X., Kong, A., Bacca, M., & Pratap-Singh, A. (2024). Cold Plasma for the Modification of the Surface Roughness of Microparticles. *ACS Omega*, 9(33), 35634–35644. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03787>
- Schmidt, A., Tschang, C. Y. T., Sann, J., & Thoma, M. H. (2022). Cold Atmospheric Plasma Decontamination of FFP3 Face Masks and Long-Term Material Effects. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 6(4), 493–502. <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2021.3130746>
- Shafa Savira Vaditya, & Gita Cahya Eka Darma. (2023). Pengaruh Penerapan Teknologi Plasma Pada Sheetmask Sebagai Peningkatan Penjerapan Essence. *Jurnal Riset Farmasi*, 65–68. <https://doi.org/10.29313/jrf.v3i2.3111>
- Syukri, Y. (2018). Teknologi sediaan obat dalam solid. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (Vol. 13).
- Tungadi, R. (2020). Teknologi Nano Sediaan Liquida dan Semisolid. In *Buku Ajar* (Issue 1989).
- Utami, A. N., Hikmawati, D., & Andarini, M. Y. (n.d.). *Gambaran Kejadian Acne Vulgaris Berdasarkan Faktor-Faktor yang Memengaruhinya pada Siswa dan Siswi Kelas XII SMAN 6 Bandung Periode Mei-Juni Tahun 2023* A R T I C L E I N F O. <https://journals.sangkuriangpublisher.com/pharmacomedic>
- Yosi Siti Solihah, & Fikri Hidayat. (2022). Pengaruh Metode Plasma dalam Peningkatan Penyerapan Minyak Kayu Manis (Cinnamon oil) pada Kaos Kaki dan Uji Aktivitas Antibakterinya terhadap Staphylococcus epidermidis Penyebab Bau Kaki. *Jurnal Riset Farmasi*, 1(2), 124–132. <https://doi.org/10.29313/jrf.v1i2.567>