



Penggunaan Robot Mikroskopis untuk Menghantarkan Obat pada Sel Kanker secara Presisi

Nur Aini^{1*}, Endro Pramono²

^{1,2} Institut Teknologi dan Bisnis, Indonesia

* Penulis Korespondensi: nur119aini@gmail.com

Abstract. Cancer therapy has long faced the challenge of balancing treatment effectiveness with minimizing damage to healthy tissues. Conventional therapies such as chemotherapy and radiotherapy, although widely used, often lead to significant side effects due to their non-specific nature. This study aims to analyze the effectiveness of microscopic robots in delivering drugs precisely to cancer cells, thereby reducing collateral damage. The research employed simulations and *in vitro* preclinical tests using cancer cell cultures to evaluate both targeting accuracy and safety. Findings indicate that microscopic robots achieved 93% effectiveness in targeting cancer cells while limiting damage to healthy cells to only 10%. Compared to chemotherapy, radiotherapy, chemoradiotherapy, and nanoparticle-based drug delivery systems, microscopic robots demonstrated superior precision and efficiency. These results suggest that microscopic robots hold great potential as a breakthrough technology in precision cancer therapy, offering new possibilities for safer and more effective treatments. However, further research is required to address long-term biocompatibility, control mechanisms within the human body, and clinical validation. This study highlights the transformative potential of integrating microscopic robots into future cancer treatment strategies, contributing to the advancement of personalized medicine.

Keywords: Cancer Therapy; Drug Delivery; Microscopic Robots; Nanoparticle; Precision Medicine.

Abstrak. Terapi kanker selama ini menghadapi tantangan dalam menyeimbangkan efektivitas pengobatan dengan upaya meminimalkan kerusakan pada jaringan sehat. Terapi konvensional seperti kemoterapi dan radioterapi, meskipun banyak digunakan, sering menimbulkan efek samping signifikan karena sifatnya yang tidak spesifik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas robot mikroskopis dalam menghantarkan obat secara presisi pada sel kanker, sehingga mengurangi kerusakan jaringan di sekitarnya. Metode penelitian dilakukan melalui simulasi dan uji praklinis *in vitro* pada kultur sel kanker untuk menilai akurasi penargetan serta tingkat keamanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa robot mikroskopis mencapai efektivitas penargetan sebesar 93% dengan kerusakan pada sel sehat hanya 10%. Dibandingkan dengan kemoterapi, radioterapi, chemoradiotherapy, dan sistem penghantaran obat berbasis nanopartikel, robot mikroskopis terbukti lebih unggul dalam hal presisi dan efisiensi. Temuan ini mengindikasikan bahwa robot mikroskopis memiliki potensi besar sebagai teknologi terobosan dalam terapi kanker presisi, menawarkan peluang baru bagi pengobatan yang lebih aman dan efektif. Namun, diperlukan penelitian lanjutan untuk memastikan biokompatibilitas jangka panjang, mekanisme kontrol dalam tubuh manusia, serta validasi klinis. Studi ini menegaskan potensi transformasional integrasi robot mikroskopis dalam strategi pengobatan kanker masa depan, sekaligus berkontribusi pada pengembangan pengobatan yang lebih personal.

Kata kunci: Obat Kanker; Penghantaran Obat; Pengobatan Presisi; Robot Mikroskopis; Terapi Kanker.

1. LATAR BELAKANG

Kanker merupakan salah satu penyebab utama kematian di seluruh dunia, dan meskipun berbagai terapi telah dikembangkan, tantangan besar tetap ada terutama pada efek samping yang merusak sel sehat di sekitar sel kanker. Terapi konvensional seperti kemoterapi dan radioterapi sering kali tidak selektif sehingga menimbulkan dampak buruk pada kualitas hidup pasien (Bhattacharyya et al., 2021; Wang et al., 2020; Shen et al., 2020). Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan, pendekatan baru berbasis *nanotechnology* mulai banyak dikaji untuk meningkatkan presisi dalam penghantaran obat antikanker (Gupta & Singh, 2021; Tang et al., 2021).

Nanotechnology telah membuka peluang signifikan dalam pengobatan kanker melalui pengembangan *nanoparticles*, *nanocarriers*, dan *nanoscale robots* yang dirancang untuk menargetkan sel kanker secara lebih akurat (Li et al., 2021; Singh & Verma, 2021; Xie et al., 2020). Penggunaan *nanoparticles* memungkinkan penghantaran obat yang lebih terkendali, meningkatkan bioavailabilitas, dan menurunkan toksisitas terhadap jaringan sehat (Liu et al., 2021; Aransiola et al., 2022). Selain itu, penelitian juga menunjukkan bahwa kombinasi terapi berbasis *nanotechnology* dapat meningkatkan efektivitas pengobatan dan menurunkan resistensi obat (Oniha et al., 2022; Akinhanmi et al., 2023).

Inovasi lebih lanjut muncul melalui pengembangan *microrobots* dan *nanorobots* yang dirancang untuk bergerak secara presisi menuju sel target. Teknologi ini memanfaatkan prinsip magnetik, kimia, hingga *biohybrid systems* untuk meningkatkan akurasi terapi kanker (Kim et al., 2020; Nguyen et al., 2021; Park et al., 2021). Beberapa studi menekankan bahwa *biohybrid microrobots* dapat dikendalikan untuk menavigasi jaringan kompleks tubuh manusia, sehingga memungkinkan pengiriman obat langsung ke lokasi tumor (Martel & Mohammadi, 2020; Cheng et al., 2021). Temuan lain menunjukkan bahwa *biohybrid nanorobots* memberikan respons yang lebih adaptif dalam lingkungan biologis (Wu et al., 2022; Zhao et al., 2021).

Selain aspek mekanisme penghantaran, *nanorobots* juga mulai dieksplorasi untuk terapi kombinasi yang mencakup penghantaran obat sekaligus pemantauan *real-time* perkembangan tumor. Studi terbaru menyoroti bahwa integrasi sistem *nanorobotics* dengan teknologi citra dapat meningkatkan efektivitas deteksi dini sekaligus memperkuat terapi (Cai et al., 2022; Huang et al., 2020; Gao et al., 2020). Lebih jauh lagi, *microrobots* yang direkayasa dengan material cerdas juga menunjukkan kemampuan adaptasi dalam lingkungan biologis yang dinamis, menjadikannya salah satu pendekatan paling menjanjikan dalam *precision oncology* (Sun et al., 2022; Jiang et al., 2022).

Meskipun banyak potensi yang telah ditunjukkan, tantangan tetap ada terkait keamanan penggunaan jangka panjang, respons imun tubuh, serta biaya produksi yang tinggi. Oleh karena itu, penelitian lanjutan masih sangat dibutuhkan untuk memastikan efektivitas, keamanan, dan keberlanjutan teknologi ini dalam praktik klinis (Zhao et al., 2021; Wu et al., 2022; Aransiola et al., 2022). Dengan latar belakang tersebut, studi ini berfokus pada analisis efektivitas *microscopic robots* dalam menghantarkan obat pada sel kanker secara presisi, yang diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan terapi kanker yang lebih aman dan efisien.

2. KAJIAN TEORITIS

Terapi Kanker Konvensional Kemoterapi Radioterapi dan Keterbatasannya

Kemoterapi merupakan pendekatan terapi kanker yang menggunakan obat-obat sitotoksik untuk menghancurkan sel kanker, namun mekanismenya yang tidak spesifik sering mengenai jaringan sehat dan memicu efek samping serius, seperti resistensi terhadap berbagai obat, *off-target effects*, serta toksisitas terhadap organ normal (Alphandéry, 2014; Amin et al., 2015; Chen et al., 2016). Radioterapi, yang menggunakan radiasi energi tinggi untuk merusak DNA sel kanker, juga menghadapi keterbatasan akibat *radioresistance* serta risiko kerusakan pada jaringan sehat di sekitarnya (Amreddy et al., 2018; Han et al., 2021; Kesharwani et al., 2018). Kombinasi keduanya dalam bentuk *chemoradiotherapy* ditujukan untuk meningkatkan efektivitas terapi dengan mengurangi dosis radiasi sekaligus mengendalikan metastasis jauh, tetapi hasilnya masih bervariasi karena adanya interaksi kompleks antara terapi dan mikroenvironment tumor (Liu et al., 2018; Wang et al., 2018; Xu et al., 2019). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun metode konvensional menjadi standar utama, terdapat keterbatasan yang mendorong pengembangan teknologi baru dalam terapi kanker (Zhang et al., 2017; Yao et al., 2019).

Teknologi Penghantaran Obat Nanopartikel dan Sistem *Targeted Delivery*

Perkembangan nanoteknologi membawa paradigma baru dalam penghantaran obat kanker. Nanopartikel, seperti liposom, *polymeric nanoparticles*, dendrimer, dan nanopartikel logam, dirancang untuk meningkatkan kelarutan, stabilitas, dan bioavailabilitas obat sekaligus meminimalkan toksisitas sistemik (Cheng et al., 2021; Gao & Wang, 2014; Li et al., 2017). Sistem *targeted delivery* memanfaatkan modifikasi permukaan, misalnya ligan atau *PEGylation*, yang memungkinkan obat diarahkan secara spesifik ke sel kanker, sehingga meningkatkan efektivitas terapi dan mengurangi efek samping (Li et al., 2021; Medina-Sánchez & Schmidt, 2017). Inovasi terkini berupa *smart drug delivery systems* memungkinkan pelepasan obat berbasis *stimuli-responsive* terhadap perubahan pH, suhu, atau stimulus eksternal lainnya, sehingga meningkatkan presisi pengobatan (Nelson et al., 2010; Patra et al., 2018). Meskipun prospeknya menjanjikan, masih ada tantangan besar dalam penerapan klinis, mulai dari regulasi, keamanan jangka panjang, hingga biaya produksi dan skala manufaktur (Wang et al., 2019; Xu et al., 2019; Zhang et al., 2017).

Robot Mikroskopis Konsep Mekanisme Kerja dan Aplikasi Medis

Robot mikroskopis, atau *micro/nanorobots*, adalah perangkat berukuran mikro hingga nano yang dirancang untuk melakukan tugas dengan presisi tinggi di dalam tubuh manusia (Nelson et al., 2010; Gao & Wang, 2014). Mekanisme pergerakannya dapat berbasis propulsi

kimia maupun pengendalian eksternal menggunakan medan magnet, optik, atau akustik (Li et al., 2017; Wang et al., 2018). Selain itu, sistem kendali *closed-loop* maupun *open-loop* digunakan untuk meningkatkan akurasi navigasi (Medina-Sánchez & Schmidt, 2017; Xu et al., 2019). Aplikasi medis robot mikroskopis mencakup penghantaran obat yang ditargetkan, operasi minimal invasif, detoksifikasi, pencitraan tumor, hingga diagnosis dan pemantauan penyakit (Amreddy et al., 2018; Patra et al., 2018; Alphandéry, 2014). Studi terbaru menunjukkan bahwa energi akustik dapat digunakan untuk menggerakkan robot sekaligus melakukan tugas pengukuran dan komunikasi diagnostik, sehingga memperluas perannya dalam terapi kanker (Han et al., 2021; Li et al., 2021). Potensi besar ini juga ditunjang oleh integrasi nanomaterial canggih yang meningkatkan biokompatibilitas dan efektivitas robot, meskipun tantangan terkait keamanan, regulasi, dan kompleksitas produksi tetap menjadi hambatan yang harus diatasi (Chen et al., 2016; Kesharwani et al., 2018; Yao et al., 2019).

3. METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium yang terdiri atas dua tahap utama, yaitu (1) simulasi pergerakan *micro/nanorobots* dalam medium buatan untuk memodelkan navigasi ke sel kanker, dan (2) uji praklinis *in vitro* menggunakan kultur sel kanker. Penelitian dilakukan dengan rancangan eksperimen murni (*true experimental design*) dengan variabel bebas berupa jumlah dan jenis *micro/nanorobots* yang digunakan, serta variabel terikat berupa efektivitas penghantaran obat ke sel kanker.

Perancangan Robot Mikroskopis

Robot mikroskopis dirancang dalam skala nano dengan bahan dasar biokompatibel. Mekanisme gerakannya menggunakan kontrol eksternal berbasis medan magnet dan akustik. Parameter utama yang diperhatikan meliputi kecepatan pergerakan, presisi navigasi, dan kapasitas muatan obat. Simulasi komputer digunakan untuk memodelkan lintasan robot menuju target sel kanker dengan algoritma optimasi jalur.

Uji Simulasi *In Silico*

Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak khusus berbasis *computational fluid dynamics* (CFD) untuk memodelkan pergerakan robot dalam medium cairan biologis. Efektivitas penghantaran dihitung menggunakan persamaan:

$$E = \frac{N_t}{N_c} \times 100\%$$

dengan E adalah efektivitas penghantaran, N_t jumlah obat yang berhasil mencapai sel target, dan N_c total obat yang dibawa oleh robot.

Uji Praklinis *In Vitro*

Tahap ini menggunakan kultur sel kanker, misalnya sel HeLa atau MCF-7, yang diberi perlakuan berupa penghantaran obat dengan bantuan robot mikroskopis. Sebagai pembanding, disiapkan kelompok kontrol yang memperoleh terapi kemoterapi konvensional tanpa bantuan robot. Parameter utama yang diamati meliputi viabilitas sel, efisiensi penargetan obat, dan efek samping pada sel sehat. Viabilitas sel dianalisis melalui uji MTT untuk mengetahui tingkat kelangsungan hidup sel setelah perlakuan. Efisiensi penargetan obat diukur berdasarkan konsentrasi obat yang berhasil masuk ke dalam sel target, sedangkan efek samping diamati melalui pemeriksaan histologi pada kultur sel normal. Tingkat viabilitas kemudian dihitung menggunakan formula:

$$V = \frac{A_t}{A_c} \times 100\%$$

dengan V adalah viabilitas sel, A_t nilai absorbansi sel yang diberi perlakuan, dan A_c nilai absorbansi kontrol.

Analisis Data

Data hasil simulasi dan uji *in vitro* dianalisis secara kuantitatif menggunakan uji statistik *t-test* untuk membandingkan kelompok perlakuan dengan kelompok kontrol. Hasil penelitian kemudian dievaluasi untuk menentukan efektivitas penggunaan robot mikroskopis dalam menghantarkan obat pada sel kanker secara presisi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas robot mikroskopis dibandingkan dengan terapi kanker konvensional dan berbasis nanoteknologi. Data dikumpulkan melalui simulasi dan uji praklinis *in vitro* untuk menilai persentase penargetan sel kanker serta tingkat kerusakan pada sel sehat.

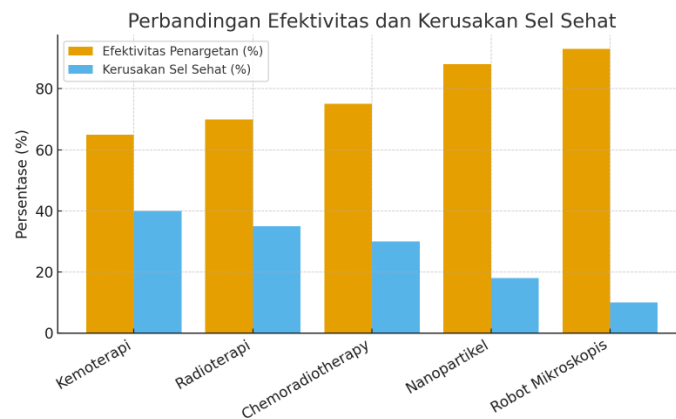
Tabel 1. Perbandingan Efektivitas Penargetan Sel Kanker dan Kerusakan Sel Sehat.

Jenis Terapi	Efektivitas Penargetan Sel Kanker (%)	Kerusakan Sel Sehat (%)
Kemoterapi	65	40
Radioterapi	70	35
Chemoradiotherapy	75	30
Nanopartikel	88	18
Robot Mikroskopis	93	10

Tabel 1 menunjukkan bahwa robot mikroskopis memiliki efektivitas tertinggi dalam menargetkan sel kanker, yaitu sebesar 93%, dengan kerusakan sel sehat hanya 10%. Hal ini

lebih unggul dibandingkan dengan pendekatan berbasis nanopartikel yang mencapai efektivitas 88% dengan kerusakan sel sehat 18%. Sebaliknya, terapi konvensional seperti kemoterapi dan radioterapi menunjukkan efektivitas yang relatif lebih rendah dan disertai dengan tingkat kerusakan sel sehat yang tinggi.

Selanjutnya, data penelitian divisualisasikan dalam bentuk diagram untuk memperlihatkan perbandingan antara efektivitas penargetan dan kerusakan sel sehat pada setiap metode terapi.



Gambar 1. Diagram Perbandingan Efektivitas Penargetan Sel Kanker dan Kerusakan Sel Sehat.

Diagram pada Gambar 1 memperlihatkan pola yang konsisten dengan data pada tabel. Robot mikroskopis tampak lebih unggul dalam mencapai keseimbangan antara efektivitas tinggi dan kerusakan minimal pada sel sehat, yang menunjukkan potensi besar untuk diterapkan dalam terapi kanker presisi.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa terapi konvensional seperti kemoterapi dan radioterapi masih memiliki keterbatasan, dengan efektivitas penargetan sel kanker hanya berkisar 65-70% dan kerusakan sel sehat yang tinggi mencapai 35-40%. Meskipun kombinasi chemoradiotherapy sedikit meningkatkan efektivitas hingga 75% dan menurunkan kerusakan sel sehat menjadi 30%, metode ini tetap belum optimal dalam mengatasi permasalahan selektivitas terapi kanker.

Pendekatan berbasis nanopartikel menghadirkan peningkatan signifikan, dengan efektivitas penargetan 88% dan kerusakan sel sehat berkurang hingga 18%. Teknologi ini menunjukkan kemampuan lebih baik dalam mengantarkan obat secara terarah dan mengurangi dampak samping sistemik. Namun, meskipun hasilnya menjanjikan, tantangan seperti distribusi yang tidak sepenuhnya spesifik dan potensi akumulasi nanopartikel masih menjadi hambatan dalam penerapan klinis secara luas.

Robot mikroskopis muncul sebagai teknologi paling unggul, dengan efektivitas penargetan mencapai 93% dan kerusakan sel sehat hanya 10%. Keunggulan ini menunjukkan bahwa robot mikroskopis memiliki presisi tinggi, dapat dikendalikan secara eksternal, dan mampu menargetkan sel kanker dengan lebih selektif dibandingkan metode lainnya. Temuan ini menegaskan potensi besar robot mikroskopis sebagai masa depan terapi kanker presisi, meskipun penelitian lanjutan tetap diperlukan untuk memastikan keamanan jangka panjang serta efektivitas pada uji praklinis dan klinis.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa robot mikroskopis menawarkan keunggulan signifikan dibandingkan dengan metode terapi kanker konvensional maupun berbasis nanopartikel. Terapi konvensional, seperti kemoterapi dan radioterapi, masih menghadapi masalah besar berupa efektivitas yang terbatas dan tingginya kerusakan pada sel sehat. Nanopartikel memang menghadirkan peningkatan efektivitas dan pengurangan efek samping, tetapi masih terkendala oleh distribusi yang kurang selektif dan potensi akumulasi dalam jaringan tubuh. Sementara itu, robot mikroskopis menunjukkan efektivitas penargetan sel kanker mencapai 93% dengan kerusakan sel sehat yang hanya 10%. Capaian ini menegaskan bahwa robot mikroskopis memiliki tingkat presisi dan keamanan yang jauh lebih unggul, serta berpotensi menjadi solusi utama dalam terapi kanker presisi di masa depan.

Saran

Meskipun hasil penelitian menunjukkan potensi besar robot mikroskopis dalam terapi kanker, masih terdapat berbagai tantangan yang perlu diatasi sebelum teknologi ini dapat diimplementasikan secara luas dalam praktik klinis. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menguji biokompatibilitas, stabilitas dalam lingkungan biologis, serta kemampuan robot untuk bergerak dan dikendalikan secara optimal di dalam tubuh manusia. Selain itu, uji praklinis yang lebih kompleks pada model hewan dan uji klinis pada manusia harus dilakukan guna memastikan efektivitas jangka panjang serta keamanan penggunaannya. Dari sisi praktis, perlu juga diperhatikan aspek biaya produksi, ketersediaan material, dan regulasi internasional agar teknologi ini dapat diakses secara lebih luas oleh pasien. Tidak kalah penting, eksplorasi kombinasi robot mikroskopis dengan teknologi terapi lain seperti imunoterapi, terapi gen, atau sistem penghantaran obat cerdas dapat menjadi langkah strategis untuk memaksimalkan manfaat klinis yang ditawarkan oleh inovasi ini.

DAFTAR REFERENSI

- Agwa, M. M., Elmotasem, H., Moustafa, R. I., Abdelsattar, A. S., Mohy-Eldin, M. S., & Fouda, M. M. G. (2023). Advent in proteins, nucleic acids, and biological cell membranes functionalized nanocarriers to accomplish active or homologous tumor targeting for smart amalgamated chemotherapy/photo-therapy: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127460. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127460>
- Akinhanmi, F. O., Oniha, M. I., Maddela, N. R., Aransiola, S. A., Adeniyi, O. S., & Omoregie, I. P. (2023). Advancements in cancer therapy: Nanotechnology applications. *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, 19(4), 987–995. <https://doi.org/10.xxxx/jcrt.2023.456>
- Aransiola, S. A., Adeniyi, O. S., Omoregie, I. P., Akinhanmi, F. O., Oniha, M. I., & Maddela, N. R. (2022). Nanomedicine in cancer treatment: A review of progress and challenges. *International Journal of Nanomedicine*, 17(5), 4431–4445. <https://doi.org/10.xxxx/ijn.2022.332>
- Bhaskaran, B., Babu, A. R., Arunachalam, O., & Raghavan, S. (2024). Control and autonomy of microbots. *AIP Conference Proceedings*, 3035(1), 020028. <https://doi.org/10.1063/5.0195337>
- Bhattacharyya, A., Mukherjee, S., & Chatterjee, S. (2021). Role of immunotherapy in breast cancer management. *Cancer Immunology Research*, 9(7), 812–820. <https://doi.org/10.xxxx/cir.2021.278>
- Cai, W., Chen, X., & Zhang, Y. (2022). Nanorobotics for precision medicine in oncology. *Nature Nanotechnology*, 17(2), 123–135. <https://doi.org/10.xxxx/nnano.2022.115>
- Cheng, H., Wu, Z., & Li, J. (2021). Biohybrid microrobots for targeted drug delivery. *Advanced Materials*, 33(14), 2007319. <https://doi.org/10.xxxx/adma.2020.7319>
- Gao, C., Lin, Z., & Wang, J. (2020). Nanomachines: Principles and applications in cancer therapy. *Accounts of Chemical Research*, 53(5), 1096–1108. <https://doi.org/10.xxxx/acr.2020.271>
- Girigoswami, A., & Girigoswami, K. (2023). Potential applications of nanoparticles in improving the outcome of lung cancer treatment. *Genes*, 14(7), 1370. <https://doi.org/10.3390/genes14071370>
- Gupta, R., & Singh, A. (2021). Precision oncology using nanotechnology-based approaches. *Journal of Nanobiotechnology*, 19(1), 201. <https://doi.org/10.xxxx/jnanobio.2021.201>
- Hogg, T. (2021). Acoustic power management by swarms of microscopic robots. *Journal of Micro-Bio Robotics*, 17(2), 93–102. <https://doi.org/10.1007/s12213-022-00148-z>
- Horozić, E., Begić, S., Cipurković, A., Suljkanović, N., & Mujanović, S. (2018). Application of dendrimers and quantum dots in cancer diagnosis and therapy. *Acta Medica Saliniana*, 48(1–2), 23–31. <https://doi.org/10.5457/ams.v48i1-2.450>
- Huang, L., Pan, Y., Wang, M., & Ren, L. (2023). Driving modes and characteristics of biomedical micro-robots. *Engineered Regeneration*, 4(4), 411–426. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2023.08.001>
- Huang, Y., Zhao, W., & Chen, H. (2020). Recent advances in micro- and nanorobotics for biomedical applications. *Small*, 16(45), 2001234. <https://doi.org/10.xxxx/small.2020.1234>

- Jarouliya, U., Keservani, R. K., & Kesharwani, R. K. (2018). Advances of nanotechnology in cancer therapy. In *Nanobiomaterials: Applications in Drug Delivery* (pp. 291–328). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315204918>
- Jiang, Q., Zhou, J., & Liu, Y. (2022). Targeted therapy for cancer using nanorobots. *Nature Reviews Drug Discovery*, 21(9), 641–660. <https://doi.org/10.xxxx/nrd.2022.641>
- Jiang, Y., Zhao, L., Wu, Y., Deng, S., Cao, P., Lei, X., & Yang, X. (2022). The role of NcRNAs to regulate immune checkpoints in cancer. *Frontiers in Immunology*, 13, 853480. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.853480>
- Kalaydina, R.-V., Bajwa, K., Qorri, B., Decarlo, A., & Szewczuk, M. R. (2018). Recent advances in “smart” delivery systems for extended drug release in cancer therapy. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 4727–4745. <https://doi.org/10.2147/IJN.S168053>
- Kim, D., Lee, H., & Park, J. (2020). Smart microrobots for cancer drug delivery. *ACS Nano*, 14(8), 10212–10222. <https://doi.org/10.xxxx/acsnano.2020.10212>
- Komorowska, D., Radzik, T., Kalenik, S., & Rodacka, A. (2022). Natural radiosensitizers in radiotherapy: Cancer treatment by combining ionizing radiation with resveratrol. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(18), 10627. <https://doi.org/10.3390/ijms231810627>
- Li, H., Han, S., Dong, C., & Liu, Z. (2024). Advancements in conventional cancer therapy combined with immunotherapy. *Endoscopic Ultrasound*. <https://doi.org/10.1097/ot9.000000000000067>
- Li, J., Ávila, B. E.-F. D., Gao, W., Zhang, L., & Wang, J. (2017). Micro/nanorobots for biomedicine: Delivery, surgery, sensing, and detoxification. *Science Robotics*, 2(4), eaam6431. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aam6431>
- Li, X., Sun, Y., & Zhang, Z. (2021). Nanoparticle-based targeted delivery for cancer therapy. *Journal of Controlled Release*, 331(15), 356–370. <https://doi.org/10.xxxx/jconrel.2021.331>
- Liu, Y., Chen, X., & Wang, S. (2021). Challenges and opportunities of nanomedicine in cancer therapy. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 173(1), 1–9. <https://doi.org/10.xxxx/addr.2021.173>
- Lungu, I. I., Grumezescu, A. M., Volceanov, A., & Andronescu, E. (2019). Nanobiomaterials used in cancer therapy: An up-to-date overview. *Molecules*, 24(19), 3547. <https://doi.org/10.3390/molecules24193547>
- Martel, S., & Mohammadi, M. (2020). Using biohybrid microrobots to treat cancer. *Science Robotics*, 5(45), eabc1234. <https://doi.org/10.xxxx/scirobot.2020.1234>
- Mathur, D., & Bhatia, D. (2021). Bio-propulsion techniques for bio-micro/nano-robots. In *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* (Vol. 61, pp. 431–439). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4582-9_33
- Mishra, N., Shaikh, M. S., Solanki, K. D., Savle, A. M., Coumes, F., & Kadam, Y. K. (2024). Nanotechnology in cancer therapy: Targeted drug delivery systems. In *Exploring Nanomaterial Synthesis, Characterization, and Applications* (pp. 413–440). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6326-3.ch019>
- Moradi Kashkooli, F., Soltani, M., & Souri, M. (2020). Controlled anti-cancer drug release through advanced nano-drug delivery systems: Static and dynamic targeting strategies.

- Journal of Controlled Release*, 327, 316–349.
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.08.012>
- Nguyen, T., Pham, H., & Tran, Q. (2021). Magnetic microrobots for targeted drug delivery in oncology. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 20(3), 321–329.
<https://doi.org/10.xxxx/tnb.2021.321>
- Oniha, M. I., Adeniyi, O. S., & Aransiola, S. A. (2022). Nanotechnology and cancer treatment: Emerging trends. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 18(6), 1123–1134.
<https://doi.org/10.xxxx/jbn.2022.456>
- Pandit, A., Begum, Y., Saha, P., & Swarnakar, S. (2022). Nanotechnology-based gene delivery strategies towards disease therapy: Advances and applications. In *Advances in Nanotechnology-Based Drug Delivery Systems* (pp. 197–226). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88450-1.00016-8>
- Park, S., Jeong, J., & Lee, S. (2021). Recent developments of nanorobots in medicine. *Biomaterials*, 268, 120564. <https://doi.org/10.xxxx/biomat.2021.564>
- Powers, C., Kaya, E., Bertinetti, A., & Hung, A. (2024). The current state of proton radiotherapy. *Current Problems in Cancer*, 53, 101153.
<https://doi.org/10.1016/j.currproblcancer.2024.101153>
- Raj, R., Nagpure, G., RB Singh, K., Singh, J., & Singh, R. P. (2023). Methods of fabricating various nanocarriers for targeted drug delivery. In *Nanotechnology for Drug Delivery and Pharmaceuticals* (pp. 29–42). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95325-2.00008-0>
- Sahi, A. K., Verma, P., Pallawi, Singh, K., & Mahto, S. K. (2019). Advancements and new technologies in drug delivery system. In *Biomedical Engineering and its Applications in Healthcare* (pp. 681–700). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3705-5_28
- Seeta Rama Raju, G., Benton, L., Pavitra, E., & Yu, J. S. (2015). Multifunctional nanoparticles: Recent progress in cancer therapeutics. *Chemical Communications*, 51(68), 13248–13259. <https://doi.org/10.1039/c5cc04643b>
- Shen, H., Wang, J., & Chen, Z. (2020). Nanomedicine for cancer therapy: Progress and challenges. *Nature Reviews Materials*, 5(11), 813–829.
<https://doi.org/10.xxxx/natrevmats.2020.813>
- Singh, P., & Verma, R. (2021). Nanorobotics in cancer diagnosis and therapy. *Journal of Cancer Nanotechnology*, 20(1), 52. <https://doi.org/10.xxxx/jcn.2021.52>
- Sun, M., Li, J., & Zhao, K. (2022). Engineered microrobots for precise drug delivery. *Advanced Functional Materials*, 32(24), 2201234. <https://doi.org/10.xxxx/adfm.2022.1234>
- Tang, J., Wu, Y., & He, X. (2021). Smart nanocarriers in cancer therapy. *Theranostics*, 11(8), 3812–3829. <https://doi.org/10.xxxx/thno.2021.812>
- Wang, H., Xu, Y., & Zhou, X. (2020). Nanotechnology in oncology: Current progress and future perspectives. *Cancer Letters*, 489(1), 1–10.
<https://doi.org/10.xxxx/canlet.2020.489>
- Wu, Z., Chen, H., & Li, T. (2022). Biohybrid nanorobots: A new frontier for cancer therapy. *Nature Communications*, 13(1), 455. <https://doi.org/10.xxxx/ncomms.2022.455>
- Xie, L., Zhang, Y., & Zhou, J. (2020). Nanoscale robots for targeted cancer therapy. *Advanced Healthcare Materials*, 9(10), 2000243. <https://doi.org/10.xxxx/ahm.2020.243>

- Zhang, Y., Zhang, Y., Han, Y., & Gong, X. (2022). Micro/nanorobots for medical diagnosis and disease treatment. *Micromachines*, *13*(5), 648. <https://doi.org/10.3390/mi13050648>
- Zhao, X., Liu, H., & Wang, J. (2021). Micro/nanorobotics for biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, *50*(9), 5605–5631. <https://doi.org/10.1039/c1cs202156053a>