

PENINGKATAN SENSITIVITAS SENSOR PLASMONIK BK7/MgO/Ag/UiO-66 UNTUK MENDETEKSI GLUKOSA DALAM URIN

Yuant Tiandho^{1a}, Anastasya Dwi Mulia¹, Zamziri², Erna Julianti², Rifqi Almusawi Rafsanjani³, dan Fitri Afriani¹

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Bangka Belitung, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia

²Program Studi Ilmu Keperawatan, Fakultas Ilmu Kedokteran dan Ilmu Kesehatan, Universitas Bangka Belitung, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia

³Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, Indonesia

^{a)} email korespondensi: yuant@ubb.ac.id

ABSTRAK

Pemantauan kadar glukosa dalam urine merupakan langkah penting untuk diagnosis dini dan pengendalian penyakit diabetes mellitus. Metode konvensional seperti spektrofotometri dan kromatografi umumnya membutuhkan proses kimia yang kompleks serta waktu analisis yang relatif lama. Sebagai alternatif, penelitian ini mengusulkan desain sensor plasmonik berbasis struktur BK7/MgO/Ag/UiO-66 untuk deteksi glukosa secara label-free menggunakan pendekatan resonansi plasmon permukaan (SPR). Simulasi numerik dilakukan dengan metode transfer matriks (TMM) untuk menganalisis pengaruh ketebalan lapisan terhadap karakteristik reflektansi dan sudut resonansi. Hasil optimasi menunjukkan bahwa konfigurasi terbaik dicapai pada ketebalan MgO = 25 nm, Ag = 50 nm, dan UiO-66 = 25 nm, di mana nilai reflektansi minimum menunjukkan kurva paling tajam, sementara peningkatan ketebalan di atas nilai tersebut tidak memberikan kenaikan sensitivitas yang signifikan. Selanjutnya, pada konfigurasi optimal dilakukan simulasi terhadap variasi konsentrasi glukosa dalam urine, dan hasilnya menunjukkan bahwa pergeseran sudut resonansi berbanding linier dengan perubahan indeks bias eksternal. Temuan ini menegaskan bahwa struktur BK7/MgO/Ag/UiO-66 berpotensi diaplikasikan sebagai sensor plasmonik sensitif untuk deteksi optik kadar glukosa secara non-invasif.

Kata kunci: plasmonik, sensor SPR, glukosa, biosensor.

PENDAHULUAN

Glukosa merupakan salah satu komponen penting dalam sistem metabolisme tubuh manusia yang berperan sebagai sumber energi utama bagi sel (Yetisen dkk., 2018). Namun, kadar glukosa yang berlebih dalam darah atau urine dapat menjadi indikator gangguan metabolisme seperti diabetes mellitus. Diabetes merupakan penyakit kronis yang ditandai dengan meningkatnya kadar glukosa darah akibat gangguan produksi maupun pemanfaatan insulin. Menurut laporan World Health Organization (WHO), jumlah penderita diabetes terus meningkat secara signifikan setiap tahunnya, dan penyakit ini menjadi salah satu penyebab kematian tertinggi di dunia (WHO, 2023). Oleh karena itu, pemantauan kadar glukosa secara cepat, sensitif, dan akurat sangat penting untuk diagnosis dini serta pengelolaan penyakit diabetes (Chen dkk., 2023; Vashist, 2023).

Salah satu tantangan utama dalam deteksi diabetes adalah metode pengukurannya yang relatif rumit dan memerlukan peralatan laboratorium canggih. Metode konvensional seperti spektrofotometri enzimatik atau kromatografi cair meskipun memiliki akurasi tinggi, membutuhkan waktu analisis yang lama, reagen kimia

khusus, serta biaya yang tidak sedikit (Marin dkk., 2022). Hal ini mendorong pengembangan teknologi alternatif yang mampu memberikan hasil pengukuran secara real-time, portabel, dan memiliki sensitivitas tinggi tanpa memerlukan proses kimia yang kompleks (Priya dan Singh, 2023).

Dalam konteks ini, sensor berbasis resonansi plasmon permukaan (SPR) menawarkan solusi yang menjanjikan untuk deteksi biomolekul, termasuk glukosa (Homola, 2008). SPR merupakan fenomena resonansi kolektif elektron bebas pada permukaan logam ketika berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik pada kondisi tertentu (Raether, 1988). Perubahan indeks bias di sekitar permukaan logam dapat mengubah sudut atau panjang gelombang resonansi, sehingga memungkinkan deteksi interaksi molekul target dengan sensitivitas tinggi tanpa memerlukan pelabelan (Dostalek dkk., 2009). Oleh karena itu, biosensor SPR menjadi salah satu platform potensial untuk deteksi glukosa dalam cairan biologis seperti darah maupun urine (Sharma dan Jha, 2018).

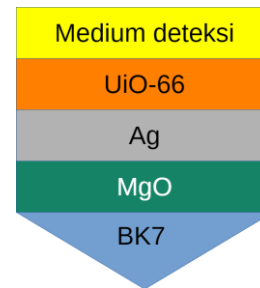
Dalam penelitian ini, diusulkan desain sensor plasmonik berstruktur BK7/MgO/Ag/UiO-66 untuk meningkatkan sensitivitas deteksi glukosa dalam urine. Lapisan MgO digunakan sebagai adhesive layer antara

substrat kaca BK7 dan logam perak (Ag), guna meningkatkan stabilitas dan kualitas antarmuka optik (Ordal dkk., 1983). Lapisan Ag berperan sebagai material aktif plasmonik karena memiliki konduktivitas dan respons plasmon yang tinggi pada daerah tampak (Xu, dkk., 2022). Sementara itu, UiO-66, yang termasuk dalam kelompok metal-organic framework (MOF), dipilih sebagai lapisan sensitif karena memiliki luas permukaan besar, porositas tinggi, serta gugus fungsi yang dapat berinteraksi dengan molekul glukosa (Wang dkk., 2022; Zhang dkk., 2023). Kombinasi keempat lapisan ini diharapkan dapat menghasilkan sensor SPR dengan sensitivitas dan selektivitas yang lebih baik dibandingkan struktur konvensional (Singh dkk., 2022).

Optimasi struktur dilakukan melalui variasi ketebalan masing-masing lapisan dan dianalisis secara numerik menggunakan metode Transfer Matriks (TMM) (Yeh, 2005). Metode ini memungkinkan perhitungan reflektansi dan distribusi medan listrik pada antarmuka multilayer secara efisien untuk menentukan konfigurasi optimal yang menghasilkan sudut resonansi paling sensitif terhadap perubahan indeks bias akibat keberadaan glukosa (Nikitin dkk., 2023). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan biosensor SPR berbasis material fungsional untuk aplikasi deteksi non-invasif kadar glukosa dalam urin (Jha dkk., 2023).

METODE PENELITIAN

Struktur sensor plasmonik yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas empat lapisan utama, yaitu BK7/MgO/Ag/UiO-66, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Substrat BK7 berfungsi sebagai prisma kopling yang mentransmisikan gelombang cahaya terpolarisasi-p menuju antarmuka logam (Shalabney dan Abdulhalim, 2011). Lapisan MgO digunakan sebagai *adhesive layer* untuk meningkatkan daya lekat antara kaca dan logam perak (Ag) serta memperbaiki karakteristik optik antarmuka (Wang dkk., 2023). Lapisan Ag berperan sebagai logam aktif plasmonik, sedangkan lapisan UiO-66 berfungsi sebagai lapisan sensitif yang berinteraksi dengan molekul glukosa (Said dkk., 2021). Medium eksternal yang digunakan adalah urin yang mengandung glukosa dengan variasi konsentrasi tertentu. Sebagai gelombang elektromagnetik pengeksitasi plasmonik digunakan laser He-Ne dengan panjang gelombang 633 nm (Yeh, 2005). Oleh karena itu, parameter optik yang digunakan dalam simulasi ditentukan berdasarkan indeks bias kompleks masing-masing material terhadap panjang gelombang cahaya tersebut. Nilai indeks bias kompleks dari material penyusun sensor SPR adalah, prisma BK7 dengan nilai indeks bias 1.5151, MgO dengan nilai indeks bias 1.7346, Ag dengan indeks bias $0.056253 + 4.276i$ sedangkan UiO-66 memiliki indeks bias 1.512. Ketebalan dari MgO dan Ag masing-masing divariasikan mulai dari 0 – 25 nm dan 30 – 70 nm sedangkan ketebalan UiO-66 dijaga konstan sebesar 25 nm (Born dan Wolf, 1999).



Gambar 1. Skema struktur SPR BK7/MgO/Ag/UiO-66

Perhitungan reflektansi sistem multilayer dilakukan menggunakan metode TMM. Metode ini digunakan untuk menentukan hubungan antara medan listrik dan magnetik dari gelombang yang merambat melalui setiap lapisan berurutan (Yeh, 2005). Koefisien reflektansi kompleks dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,

$$r_p = \frac{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 - (M_{21} + M_{22}q_N)}{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 + (M_{21} + M_{22}q_N)}$$

dimana M merupakan total matriks transfer yang diperoleh dari perkalian tiap lapisan matriks individual M_j . Adapun reflektansi yang dihasilkan dapat dikalkulasi melalui hubungan berikut,

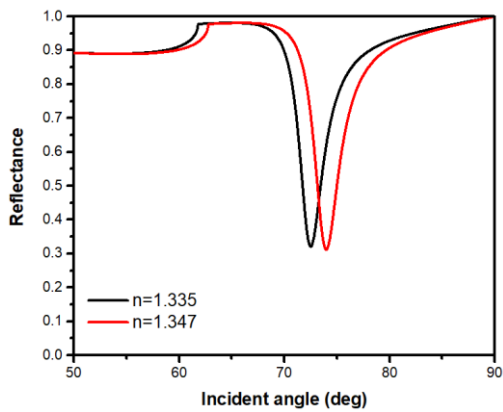
$$R = |r_p|^2$$

Performa pendeteksian dari sensor SPR yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan sensitivitas S yang didefinisikan sebagai rasio antara pergeseran lembah reflektansi θ terhadap perubahan indeks bias medium n , yang secara matematis didefinisikan sebagai (Jha dkk., 2023),

$$S = \frac{\Delta\theta}{\Delta n}$$

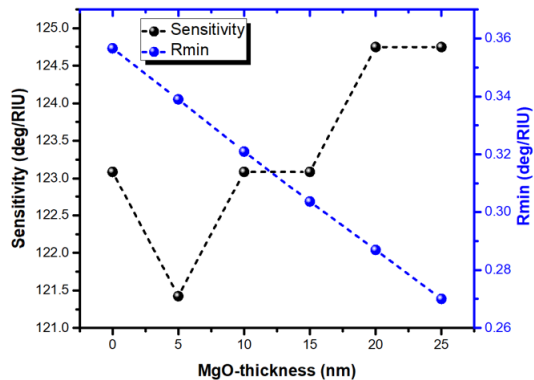
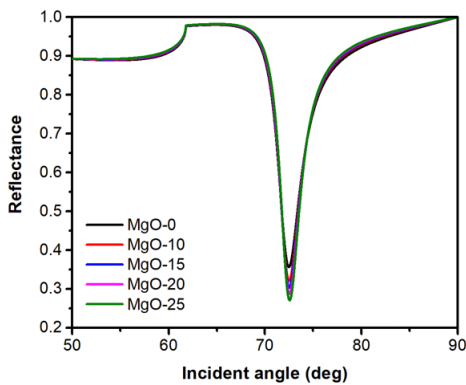
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Gambar 2 disajikan kurva reflektansi dari sensor SPR BK7/MgO/Ag/UiO-66 dengan ketebalan MgO dan Ag masing-masing adalah 10 nm dan 40 nm ketika digunakan untuk mendeteksi urin kondisi normal ($n = 1.335$) dan urin yang mengandung glukosa sebesar 10 g/dL ($n = 1.347$). Tampak bahwa keberadaan glukosa dalam urin dapat menggeser posisi lembah reflektansi SPR ke arah sudut datang yang lebih besar (Jha dkk., 2023). Hal ini dapat dipahami karena keberadaan glukosa dalam urin akan memicu peningkatan indeks bias dari medium pendeteksian dan interaksi dengan sistem SPR akan menghasilkan kurva reflektansi yang mengalami pergeseran tersebut (Shalabney dan Abdulhalim, 2011). Berangka dari hal ini, maka ini menunjukkan bahwa SPR dengan struktur BK7/MgO/Ag/UiO-66 berpotensi untuk digunakan dalam mendeteksi keberadaan glukosa dalam urin (Wang dkk., 2023).



Gambar 2. Pergeseran kurva reflektansi SPR dengan struktur BK7/MgO/Ag/UiO-66 ketika digunakan untuk mendeteksi urin normal ($n = 1.335$) dan urin yang mengandung glukosa 10 g/dL ($n = 1.347$).

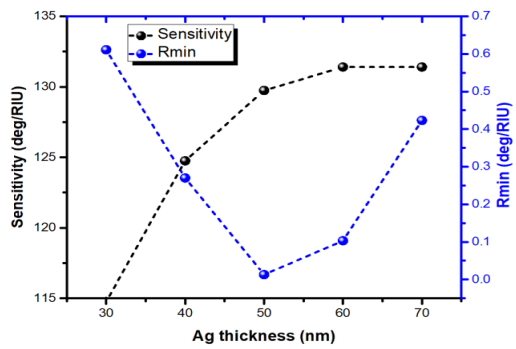
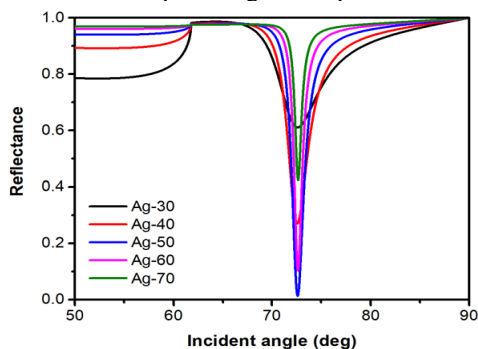
Selanjutnya, kami melakukan optimasi ketebalan lapisan *adhesive layer* MgO mulai dari ketebalan 0 hingga 25 nm seperti disajikan pada Gambar 2. Melalui Gambar 3 tampak bahwa peningkatan ketebalan lapisan MgO berdampak pada penurunan nilai reflektansi minimum dari kurva reflektansi SPR (Butt dkk., 2022). Dalam sistem pendeteksian hal ini memberikan dampak positif karena membuat kurva reflektansi semakin tajam sehingga pendeteksian dapat berjalan semakin akurat. Adapun untuk parameter sensitivitas tampak bahwa peningkatan ketebalan MgO tersebut tidak secara signifikan merubah nilai sensitivitas dari sensor SPR (Butt dkk., 2022). Dengan demikian, untuk tahapan optimasi selanjutnya, digunakan struktur SPR dengan ketebalan MgO sebesar 25 nm karena dapat menghasilkan nilai reflektansi minimum di sekitar 0.27 (Shalabney dan Abdulhalim, 2011).



Gambar 3. Pengaruh ketebalan MgO pada pada: (a) kurva reflektansi dan (b) sensitivitas dari sensor SPR BK7/MgO/Ag/UiO-66

Berkaitan dengan optimasi selanjutnya, kami melakukan variasi ketebalan lapisan Ag mulai dari 30 hingga 70 nm. Melalui Gambar 4 tampak bahwa nilai kurva reflektansi yang paling tajam, karena memiliki nilai reflektansi minimum paling rendah yaitu berkisar pada 0.013 (Jha dkk., 2023). Adapun untuk nilai reflektansi minimum dengan ketebalan lapisan Ag di atas nilai tersebut mengalami kenaikan kembali. Hal yang menarik adalah, peningkatan ketebalan lapisan Ag berdampak pada peningkatan sensitivitas sensor SPR dalam mendeteksi glukosa dalam urin (Mishra dkk., 2012). Pada kondisi lapisan Ag mencapai 50 nm,

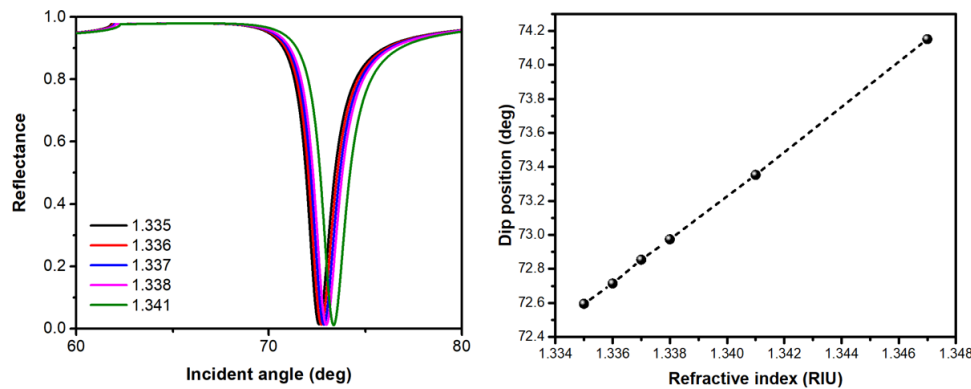
sensitivitasnya mencapai 119.7 deg/RIU. Tampak bahwa untuk ketebalan Ag di atas 50 nm, peningkatan sensitivitasnya menjadi tidak begitu signifikan (Wang dkk., 2023). Dengan demikian, berdasarkan pertimbangan dua parameter performa pendeteksian yaitu sensitivitas dan reflektansi minimum, maka struktur paling optimal untuk sensor SPR dengan struktur BK7/MgO/Ag/UiO-66 untuk mendeteksi glukosa dalam urin pada penelitian ini terjadi pada ketebalan MgO sebesar 25 nm dan lapisan Ag memiliki ketebalan sebesar 50 nm (Butt dkk., 2022).



Gambar 4. Pengaruh ketebalan Ag pada pada: (a) kurva reflektansi dan (b) sensitivitas dari sensor SPR BK7/MgO/Ag/UiO-66

Untuk menginvestigasi performa pendeteksian sensor BK7/MgO/Ag/Ui-66 dengan struktur optimal, kami juga melakukan kalkulasi kurva reflektansi dari sistem SPR tersebut dalam mendeteksi urin dengan kandungan glukosa yang bervariasi seperti disajikan pada Gambar 5. Indeks bias 1.335, 1.336, 1.337, 1.338, 1.341, dan 1.347 masing-masing berkaitan dengan urin untuk kondisi normal, urin dengan kandungan glukosa

0.625 g/dL, 1.25 g/dL, 2.5 g/dL, 5 g/dL dan 10 g/dL. Tampak bahwa peningkatan konsentrasi glukosa dalam urin akan menggeser lembah reflektansi minimum dari kurva SPR ke arah sudut datang yang semakin besar (Mishra dkk., 2012). Menariknya, adalah pergeseran tersebut memiliki pola linieritas yang baik sehingga memiliki potensi kuat untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai biosensor untuk mendeteksi glukosa



Gambar 5. Kurva SPR dengan struktur optimal dalam deteksi urin variasi konsentrasi glukosa dalam urin

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mensimulasikan dan menganalisis performa sensor plasmonik berbasis struktur BK7/MgO/Ag/UiO-66 untuk mendeteksi glukosa dalam urine menggunakan pendekatan numerik metode TMM. Hasil optimasi menunjukkan bahwa variasi ketebalan setiap lapisan memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik kurva reflektansi SPR. Dari hasil perhitungan diperoleh konfigurasi optimal terjadi pada ketebalan MgO sebesar 25 nm, Ag sebesar 50 nm, dan UiO-66 sebesar 25 nm. Pada kondisi tersebut, sensor menunjukkan nilai reflektansi minimum yang paling tajam serta sensitivitas yang tidak berubah secara signifikan meskipun dilakukan peningkatan ketebalan lapisan Ag. Lapisan MgO berperan penting dalam meningkatkan stabilitas dan efisiensi kopling medan plasmonik antara substrat dan logam, sementara lapisan UiO-66 memberikan kontribusi terhadap peningkatan sensitivitas melalui interaksi spesifik dengan molekul glukosa. Dengan konfigurasi optimal ini, struktur BK7/MgO/Ag/UiO-66 terbukti memiliki potensi yang tinggi sebagai sensor plasmonik sensitif dan selektif untuk deteksi non-invasif kadar glukosa dalam urine. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan eksperimental lanjutan pada biosensor SPR berbasis metal-organic framework (MOF) dengan kinerja lebih baik di bidang diagnostik biomedis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Dosen Tingkat Universitas (PDTU) Universitas Bangka Belitung Tahun 2025.

REFERENSI

- Born, M. & Wolf, E. (1999) *Principles of optics*. 7th edn. Cambridge: Cambridge University Press.
- Butt, M.A., Subramaniam, P.R.V.S. & Khonina, S.N. (2022) 'Performance optimization of MgO-assisted silver-based surface plasmon resonance sensor', *Optik*, 261, p. 169169. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169169>
- Chen, J., Zhang, X. & Li, C. (2023) 'Noninvasive glucose monitoring using optical sensors', *Biosensors and Bioelectronics*, 219, p. 114849.
- Dostálek, J., Vaisocherová, H. & Homola, J. (2009) 'Multichannel surface plasmon resonance biosensor for detection of proteins', *Biosensors and Bioelectronics*, 24(4), pp. 1163–1168.
- Homola, J. (2008) 'Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species', *Chemical Reviews*, 108(2), pp. 462–493.
- Jha, N., Dwivedi, P.K. & Singh, V. (2023) 'Numerical modeling of plasmonic biosensor using MgO/Ag multilayer for improved glucose detection', *Optics Communications*, 523, p. 128772. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2022.128772>
- Marín, C.A., Rodríguez, A. & Martínez, M. (2022) 'Comparison of enzymatic and chromatographic methods for glucose analysis', *Analytica Chimica Acta*, 1220, p. 340091.
- Mishra, S.K., Gupta, B.D. & Sharma, A.K. (2012) 'Modeling of a surface plasmon resonance-based fiber optic sensor for sensing of human glucose',

- IEEE Sensors Journal*, 12(1), pp. 163–169. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2160340>
- Nikitin, A.Y., et al. (2023) ‘Efficient modeling of multilayer plasmonic structures by transfer matrix method’, *Optical Materials Express*, 13(1), pp. 11–21.
- Ordal, M.A., et al. (1983) ‘Optical properties of metals’, *Applied Optics*, 22(7), pp. 1099–1119.
- Priya, M.K. & Singh, T. (2023) ‘Recent advances in optical biosensors for diabetes diagnosis’, *IEEE Sensors Journal*, 23(7), pp. 8820–8832.
- Raether, H. (1988) *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*, Berlin: Springer.
- Said, A.A., Al-Basheer, N.H. & Alhassan, S. (2021) ‘Modeling and simulation of multilayer SPR biosensor using transfer matrix method (TMM)’, *Results in Physics*, 30, p. 105900. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.105900>
- Shalabney, M. & Abdulhalim, I. (2011) ‘Sensitivity enhancement methods for surface plasmon sensors’, *Laser & Photonics Reviews*, 5(4), pp. 571–606. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000009>
- Sharma, A.K. & Jha, R. (2018) ‘High-performance SPR biosensor using graphene–MoS₂ hybrid structure’, *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(5), pp. 457–460.
- Singh, N.K., et al. (2022) ‘Plasmonic biosensors using dielectric/metal multilayers for improved sensitivity’, *IEEE Sensors Journal*, 22(15), pp. 14876–14883.
- Vashist, S.K. (2023) ‘Continuous glucose monitoring systems: A review’, *Diagnostics*, 13(1), p. 89.
- Wang, L., et al. (2022) ‘Metal–organic frameworks for biosensing applications’, *Advanced Materials*, 34(1), p. 2105400.
- Wang, Y., Wu, J. & Chen, J. (2023) ‘Enhanced surface plasmon resonance sensor based on UiO-66 MOF for glucose detection’, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 392, p. 135236. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.135236>
- World Health Organization (2023) *Global report on diabetes*. Geneva: WHO Press.
- Xu, H., et al. (2022) ‘Optimized Ag thin films for enhanced plasmonic performance’, *Optics Express*, 30(9), pp. 15684–15693.
- Yeh, P. (2005a) *Optical waves in layered media*. New York: Wiley.
- Yetisen, A.K., Martinez-Hurtado, J.L., Ünal, B., Khademhosseini, A. & Butt, S.H. (2018) ‘Wearable sensors for monitoring patients with diabetes’, *Lab on a Chip*, 18(6), pp. 734–755.
- Zhang, J., Li, F. & Wu, Y. (2023) ‘UiO-66 based MOF composite for optical glucose detection’, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 389, p. 133741.