JPFS 9 (2) 2026 340-350

Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains (JPFS)

Journal homepage: http:// journal.unucirebon.ac.id/index.php/jpfs

Tinjauan Perkembangan Pengukuran Bilirubin pada Ikterus Neonatorum: Teknologi Optik, Pembelajaran Mesin, dan Pemantauan Kontinu

Lathifa Nur Ramdhania*[1], Ahmad Aminudin[2]

[1,2]Program Studi Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia

*Email: lathifa@upi.edu

DOI: https://doi.org/10.52188/jpfs.v9i2.2575

Accepted: 24 Oktober 2026 Approved: 20 November 2026 Published: 23 November 2026

ABSTRAK

Ikterus neonatorum dialami sebagian besar bayi baru lahir dan dapat berkembang menjadi ensefalopati bilirubin bila kadar bilirubin tidak terpantau dengan tepat. Pengukuran bilirubin serum total melalui pengambilan darah masih menjadi acuan, tetapi bersifat invasif dan tidak praktis untuk pemantauan berulang. Kajian ini bertujuan memetakan perkembangan teknologi pengukuran bilirubin neonatal yang dilaporkan pada periode 2021-2026, meliputi prinsip fisis, kinerja diagnostik, dan tantangan penerapannya melalui pendekatan tinjauan naratif atas literatur dari basis data Scopus. Perkembangan teknologi bergerak dari analisis serum di laboratorium menuju perangkat uji di titik layanan, bilirubinometer transkutan berbasis spektroskopi reflektansi, pencitraan kamera dan telepon pintar berbasis pembelajaran mesin, hingga sistem pemantauan kontinu berbasis *Internet of Things*. Bilirubinometer transkutan berkorelasi baik dengan bilirubin serum, tetapi akurasinya menurun pada kadar tinggi, selama fototerapi, pada bayi prematur, dan pada kulit berpigmen gelap. Aplikasi telepon pintar menunjukkan korelasi sedang hingga kuat, tetapi masih dipengaruhi variasi kamera dan pencahayaan, sedangkan sistem pemantauan kontinu sebagian besar masih berada pada tahap purwarupa atau uji kelayakan. Teknologi non-invasif paling tepat berperan sebagai alat penapisan yang tetap memerlukan konfirmasi bilirubin serum di dekat ambang terapi. Standarisasi kalibrasi, validasi klinis multisenter, dan koreksi pigmentasi kulit menjadi prioritas pengembangan berikutnya.

Kata kunci: bilirubinometri transkutan, ikterus neonatorum, pembelajaran mesin, spektroskopi reflektansi

ABSTRACT

Neonatal jaundice affects most newborns and may progress to bilirubin encephalopathy when bilirubin levels are not monitored properly. Total serum bilirubin measured from blood samples remains the reference, but it is invasive and impractical for repeated monitoring. This study maps the development of neonatal bilirubin measurement technologies reported in 2021-2026, including their physical principles, diagnostic performance, and implementation challenges, through a narrative review of literature retrieved from the Scopus database. The technology has shifted from laboratory serum analysis toward point-of-care testing, transcutaneous bilirubinometers based on reflectance spectroscopy, camera and smartphone imaging with machine learning, and continuous monitoring systems based on the Internet of Things. Transcutaneous bilirubinometers correlate well with serum bilirubin, but their accuracy declines at high bilirubin levels, during phototherapy, in preterm infants, and in darkly pigmented skin. Smartphone applications show moderate to strong correlation but remain sensitive to camera and lighting variation, whereas most continuous monitoring systems are still at the prototype or feasibility stage. Non-invasive technologies are best positioned as screening tools that still require serum bilirubin confirmation near treatment thresholds. Calibration standardization, multicenter clinical validation, and skin pigmentation correction are priorities for future development.

Keyword: transcutaneous bilirubinometry, neonatal jaundice, machine learning, reflectance spectroscopy

@2026 Pendidikan Fisika FKIP Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon

PENDAHULUAN

Ikterus neonatorum adalah perubahan warna kuning pada kulit dan sklera bayi baru lahir akibat meningkatnya kadar bilirubin dalam darah. Kondisi ini dialami hingga 60% bayi cukup bulan dan 80% bayi prematur pada minggu pertama kehidupan (Sayyad et al., 2023). Sebagian besar kasus bersifat fisiologis dan sembuh sendiri. Namun, hiperbilirubinemia berat yang terlambat dikenali dapat berkembang menjadi kerusakan otak pada bayi, yang meninggalkan gangguan motorik serta gangguan pendengaran permanen (Kemper et al., 2022; Miyabayashi et al., 2026). Karena kerusakan tersebut dapat dicegah, pengukuran bilirubin yang tepat waktu dan akurat menjadi dasar keputusan fototerapi maupun transfusi tukar (Kemper et al., 2022).

Tetapi, penilaian derajat kuning melalui metode visual dinilai tidak andal, terutama pada bayi berkulit gelap, sehingga keputusan klinis memerlukan nilai bilirubin yang terukur (Dann et al., 2026) . Hingga kini, acuan pengukuran adalah bilirubin serum total (total serum bilirubin, TSB) dari sampel darah. Prosedur ini bersifat invasif, memerlukan fasilitas laboratorium, dan tidak praktis untuk pengukuran berulang (Shen et al., 2025). Di negara berpenghasilan rendah dan menengah, keterbatasan laboratorium sering menunda diagnosis hingga bayi telah dipulangkan ke rumah (Enweronu-Laryea et al., 2022; Sundaram et al., 2025).

Keterbatasan tersebut mendorong pengembangan beragam teknologi pengukuran. Bilirubinometer transkutan (*transcutaneous bilirubinometry*, TcB) kini menjadi alat penapisan non-invasif yang paling luas digunakan (Kucukoglu Keser et al., 2025). Studi komparatif terbaru menunjukkan kinerja yang berbeda antar perangkat TcB (Kucukoglu Keser et al., 2025). Selain itu, akurasinya juga dipengaruhi fototerapi (Ho et al., 2021) dan pigmentasi kulit (Dam-Vervloet et al., 2024). Dalam lima tahun terakhir berkembang generasi teknologi baru, yaitu pemantauan melalui aplikasi telepon pintar (Hegde et al., 2023), pemantauan kontinu berbasis kamera (Shu et al., 2026), dan sistem yang memanfaatkan *Internet of Things* (IoT) (Raghavendran et al., 2024) .

Namun, tinjauan yang ada umumnya berfokus pada satu modalitas, misalnya rancangan TcB (Sayyad et al., 2023) atau deteksi berbasis kecerdasan buatan (Achaliya et al., 2026). Masih sedikit kajian yang menghubungkan prinsip fisis pengukuran, kinerja klinis, dan persoalan standardisasi laboratorium dalam satu kerangka. Padahal, ketiga aspek ini saling menentukan, yakni ketika diketahui bahwa batas akurasi perangkat optik berakar pada interaksi cahaya dengan jaringan kulit, sedangkan nilai acuan TSB sendiri bervariasi antar laboratorium (Thomas et al., 2022; Xiao et al., 2026).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel ini bertujuan memetakan perkembangan teknologi pengukuran bilirubin terbaru untuk ikterus neonatorum dari empat aspek, yaitu prinsip fisis pengukuran, kinerja diagnostik terhadap TSB, faktor yang memengaruhi akurasi, serta tantangan implementasi dan arah pengembangan.

METODE

Kajian ini menggunakan desain tinjauan naratif (*narrative review*). Desain ini dipilih karena topik mencakup ragam teknologi dengan prinsip kerja, desain studi, dan ukuran kinerja yang tidak seragam, sehingga lebih tepat dibahas secara deskriptif-analitis daripada digabungkan secara kuantitatif melalui meta-analisis.

Penelusuran literatur dilakukan pada basis data Scopus dan terakhir diperbarui pada 1 September 2026. Kata kunci yang digunakan meliputi *neonatal jaundice*, *hyperbilirubinemia*, *bilirubin measurement*, *transcutaneous bilirubinometry*, *smartphone*, *camera*, *point-of-care, unbound bilirubin, dan standardization*, yang dikombinasikan dengan operator Boolean AND dan OR: istilah dalam kelompok kondisi klinis dan istilah dalam kelompok teknologi pengukuran masing-masing digabungkan dengan OR, lalu kedua kelompok digabungkan dengan AND. Literatur yang dipertimbangkan adalah artikel jurnal bereputasi dan prosiding konferensi ilmiah berbahasa Inggris yang membahas teknologi pengukuran bilirubin pada neonatus. Pada setiap literatur yang relevan, hanya literatur yang terbit pada periode Januari 2021-September 2026 dan melaporkan setidaknya satu

dari aspek berikut: prinsip kerja perangkat, kinerja diagnostik terhadap TSB, faktor yang memengaruhi akurasi, atau aspek implementasi dan standardisasi, yang ditinjau lebih lanjut. Pembatasan periode ini dipilih agar kajian menggambarkan kondisi teknologi yang paling mutakhir. Literatur dikeluarkan bila hanya membahas terapi tanpa aspek pengukuran, tidak melibatkan populasi neonatus, atau tidak memuat informasi tentang teknologi pengukuran. Pencarian dijalankan pada kolom judul, abstrak, dan kata kunci menggunakan string berikut:

> TITLE-ABS-KEY (("neonatal jaundice" OR "neonatal hyperbilirubinemia" OR hyperbilirubinemia) AND ("bilirubin measurement" OR "transcutaneous bilirubin*" OR smartphone OR camera OR "point-of-care" OR "unbound bilirubin" OR standardi?ation)) AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))

Seluruh hasil penelusuran diekspor ke Mendeley untuk menghapus duplikat. Seleksi kemudian dilakukan dalam dua tahap, yaitu penyaringan judul dan abstrak, lalu penilaian teks lengkap terhadap kriteria inklusi dan eksklusi. Penyaringan dilakukan oleh penulis pertama dan diperiksa oleh penulis kedua, dan perbedaan pendapat diselesaikan melalui diskusi. Dari 100 artikel hasil penelusuran, tidak ada duplikat yang dihapus, 66 artikel dikeluarkan pada penyaringan judul dan abstrak, dan 3 artikel dikeluarkan pada penilaian teks lengkap karena tidak memenuhi kriteria. Dengan demikian, sebanyak 31 literatur dianalisis.

Setiap studi diklasifikasikan menurut tahap buktinya, yaitu (1) konsep atau purwarupa, (2) studi laboratorium atau in vitro, (3) uji kelayakan atau validasi awal, (4) validasi klinis, dan (5) sintesis bukti berupa tinjauan atau meta-analisis. Penilaian kualitas metodologis dengan instrumen baku tidak dilakukan karena desain literatur yang dikaji sangat beragam, mulai dari purwarupa rekayasa hingga meta-analisis. Sebagai gantinya, tahap bukti digunakan untuk membedakan bobot temuan: temuan dari validasi klinis dan sintesis bukti menjadi dasar utama simpulan, sedangkan temuan dari purwarupa, studi in vitro, dan uji kelayakan diperlakukan sebagai indikasi awal.

Data dari setiap literatur diekstraksi menggunakan matriks yang memuat jenis teknologi, prinsip fisis, desain studi dan tahap bukti, populasi dan jumlah sampel, usia gestasi, lokasi ukur, metode pembanding, ambang diagnostik, metrik kinerja (koefisien korelasi, bias, sensitivitas, spesifisitas, dan luas area di bawah kurva ROC), serta keterbatasan yang dilaporkan. Sintesis kemudian dilakukan dalam tiga langkah. Pertama, studi dikelompokkan ke dalam empat kategori teknologi, yaitu pengukuran serum dan uji di titik layanan, bilirubinometri transkutan, pencitraan kamera dan telepon pintar berbasis pembelajaran mesin, serta pemantauan kontinu berbasis IoT. Kedua, di dalam setiap kategori, metrik kinerja dibandingkan bersama konteks studinya, yaitu populasi, usia gestasi, lokasi ukur, pembanding, dan ambang diagnostik. Angka kinerja tidak digabungkan secara statistik dan tidak dibandingkan langsung antarstudi bila populasi atau ambangnya berbeda. Ketiga, pola temuan lintas kategori ditafsirkan menggunakan prinsip fisis interaksi cahaya dengan jaringan untuk mengidentifikasi sumber bias, kesenjangan penelitian, dan implikasi praktis.

HASIL

Teknologi pengukuran bilirubin neonatal dapat diurutkan berdasarkan tingkat invasif dan frekuensi pengukurannya, dari pengukuran serum hingga pemantauan kontinu. Tetapi perlu dicatat bahwa semua teknologi non-invasif di antaranya bertumpu pada prinsip fisis yang sama, yaitu interaksi cahaya tampak dengan jaringan kulit.

Prinsip Fisis Pengukuran Optik Bilirubin

Bilirubin menyerap cahaya paling kuat pada pita biru, dengan puncak serapan di sekitar 450-460 nm. Ketika cahaya diarahkan ke kulit, sebagian dipantulkan kembali setelah dihamburkan dan diserap oleh kromofor jaringan, yaitu bilirubin, hemoglobin, dan melanin (Dam-Vervloet et al., 2024; Sayyad et al., 2023) . Hubungan antara reflektansi kulit dan konsentrasi kromofor umumnya didekati dengan hukum Beer–Lambert termodifikasi pada Persamaan (1).

$$OD(\lambda) = -\log_{10} R(\lambda) = \sum_i \varepsilon_i(\lambda) c_i \langle L(\lambda) \rangle + G(\lambda) \quad (1)$$

Pada Persamaan (1), OD adalah densitas optik dan R reflektansi terukur yang bernilai antara 0 dan 1, ε_i koefisien ekstingsi molar kromofor ke-i ($L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$), c_i adalah konsentrasinya ($mol \cdot L^{-1}$), $\langle L \rangle$ adalah panjang lintasan optik rata-rata (cm), dan G kehilangan sinyal akibat hamburan (tak

berdimensi). Persamaan ini mengasumsikan bahwa kontribusi setiap kromofor terhadap serapan bersifat aditif, bahwa $\langle L \rangle$ dan G dapat dianggap tetap pada rentang panjang gelombang yang digunakan, dan bahwa kulit dapat diperlakukan sebagai medium yang secara efektif homogen. Karena spektrum serapan melanin dan hemoglobin tumpang tindih dengan bilirubin, perangkat harus memisahkan kontribusi masing-masing kromofor. Pemisahan ini dilakukan dengan mengukur pada beberapa panjang gelombang, misalnya membandingkan pita biru dengan pita hijau, lalu menerapkan algoritma kalibrasi (Sayyad et al., 2023).

Dalam optika jaringan biologis, kulit juga dapat dimodelkan sebagai medium keruh menggunakan pendekatan difusi foton. Model ini memisahkan koefisien serapan μ_a dari koefisien hamburan tereduksi μ_s', sehingga serapan bilirubin di jaringan yang lebih dalam secara prinsip dapat dibedakan dari serapan melanin di epidermis. Atenuasi efektif cahaya dalam jaringan dinyatakan pada Persamaan (2).

$$\mu_{eff} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu_s')} \tag{2}$$

Pada Persamaan (2), μeff adalah koefisien atenuasi efektif, sedangkan μa dan μs′ masing-masing adalah koefisien serapan dan koefisien hamburan tereduksi jaringan; ketiganya memiliki satuan cm^{-1}. Persamaan (2) berlaku bila hamburan jauh lebih dominan daripada serapan ($\mu_s' \gg \mu_a$), kondisi yang umumnya terpenuhi pada jaringan kulit untuk cahaya tampak. Kedua persamaan ini menjelaskan mengapa akurasi optik bergantung pada pigmentasi, ketebalan kulit, dan kadar bilirubin, seperti ditunjukkan oleh evaluasi in vitro terbaru (Dam-Vervloet et al., 2024). Selain syarat $\mu_s' \gg \mu_a$, pendekatan difusi mengasumsikan titik pengamatan cukup jauh dari sumber cahaya dan medium yang relatif homogen. Persamaan (1) dan (2) merupakan model pendekatan untuk jaringan biologis, bukan hubungan universal yang langsung berlaku pada semua perangkat.

Perkembangan Teknologi Periode 2021-2026

Tabel 1 merangkum delapan arah perkembangan teknologi pengukuran bilirubin neonatal. Optimasi TcB dan aplikasi telepon pintar diteliti sepanjang periode kajian, sedangkan pemantauan kontinu, sistem IoT, dan uji titik layanan untuk penggunaan di rumah baru muncul pada tahun 2024-2026.

Tabel 1. Arah perkembangan teknologi pengukuran bilirubin neonatal periode 2021-2026

Arah perkembangan	Perkembangan kunci	Periode*	Tahap bukti	Rujukan
Mutu dan harmonisasi pengukuran serum	Perbedaan metode TSB yang dapat mengubah keputusan terapi; variabilitas antarlaboratorium; program mutu nasional; revisi ambang terapi dalam pedoman klinis	2022-2026	Studi laboratorium; pedoman klinis	Thomas et al. (2022); Kemper et al. (2022); Westenberg et al. (2025); Xiao et al. (2026)
Uji di titik layanan untuk klinik dan rumah	Validasi Bilistick 2.0; perangkat genggam untuk pemantauan di rumah; perbandingan akurasi dan kemudahan penggunaan	2025-2026	Validasi klinis	Sundaram et al. (2025); Krcho et al. (2026); Westenberg et al. (2026)
Penanda neurotoksisitas di luar bilirubin total	Rasio bilirubin total terhadap albumin sebagai pengganti bilirubin tak terikat	2026	Validasi klinis	Miyabayashi et al. (2026)
Optimasi protokol TcB	Pemilihan lokasi ukur pada bayi cukup bulan dan prematur; pengukuran pada kulit terlindung dan jeda waktu setelah fototerapi; interpretasi pada bayi prematur akhir	2021-2026	Validasi klinis	Ho et al. (2021); Lucanova et al. (2021); Akuamoah-Boateng et al. (2022); İşleyen et al. (2023); Gaur & Fatma (2026)
Komparasi dan rancangan perangkat TcB	Perbandingan BiliCare, JM-105, dan MBJ20; validasi pada populasi spesifik; rancangan TcB berbiaya rendah berbasis mikrokontroler	2022-2025	Validasi klinis; tinjauan rancangan	Mohamed et al. (2022); Sayyad et al. (2023); Kucukoglu Keser et al. (2025)

Arah perkembangan	Perkembangan kunci	Periode*	Tahap bukti	Rujukan
Koreksi bias optik	Kuantifikasi pengaruh warna kulit secara in vitro; koreksi estimasi TcB dengan pembelajaran mesin	2024	Studi in vitro; pengembangan model	Dam-Vervloet et al. (2024); Morimoto et al. (2024)
Aplikasi telepon pintar	Analisis reproduksi warna kamera; aplikasi berbasis sklera dan kulit; meta-analisis kinerja; sertifikasi perangkat medis; penggunaan pada bayi prematur; pergeseran ke pembelajaran mendalam	2021-2026	Purwarupa hingga validasi klinis; meta-analisis	Abebe et al. (2021); Enweronu-Laryea et al. (2022); Aune et al. (2023); Hegde et al. (2023); Ustun et al. (2023); Shen et al. (2025); Achaliya et al. (2026); Oni et al. (2026); Zhao et al. (2026)
Pemantauan kontinu dan IoT	Fototerapi terkendali sensor; selimut fototerapi berbasis IoT; pemantauan kontinu tanpa sentuhan dengan kamera RGB	2024-2026	Purwarupa; uji kelayakan	Raghavendran et al. (2024); Sojobi et al. (2025); Shu et al. (2026)

*Periode = rentang tahun terbit studi yang dirujuk pada baris tersebut.

Pengukuran Total Serum Bilirubin (TSB)

TSB tetap menjadi acuan diagnosis dan dasar keputusan terapi dengan menggunakan metode kimia diazo atau spektrofotometri langsung di laboratorium. Namun, studi terkini menunjukkan bahwa hasil pengukuran bilirubin masih berbeda antar laboratorium klinis (Xiao et al., 2026). Perbedaan metode dan kalibrator menyebabkan sampel yang sama dapat menghasilkan nilai berbeda. Selisih ini cukup besar untuk mengubah keputusan terapi bila kadar bilirubin berada di sekitar ambang fototerapi (Thomas et al., 2022). Program penilaian mutu eksternal berskala nasional menjadi upaya utama untuk mengendalikan variabilitas tersebut (Westenberg et al., 2025a).

Perangkat uji di titik layanan (*point-of-care*) mengukur bilirubin dari sampel darah kapiler dalam volume kecil dan memberikan hasil dalam hitungan menit. Bilistick 2.0 menunjukkan korelasi yang baik dengan TSB laboratorium di India Selatan, tetapi angka kegagalan pengujiannya cukup tinggi (Sundaram et al., 2025). Perangkat genggam juga diuji untuk pemantauan di rumah dalam studi *BEAT Jaundice @Home* (Westenberg et al., 2026). Perbandingan beberapa perangkat titik layanan menunjukkan adanya pertukaran antara akurasi dan kemudahan penggunaan. Keberhasilannya sangat bergantung pada pelatihan pengguna dan pengendalian mutu (Krcho et al., 2026).

Bilirubinometri Transkutan

Bilirubinometer transkutan memperkirakan kadar bilirubin dengan spektroskopi reflektansi multipanjang gelombang melalui probe yang ditempelkan pada kulit. Pengukurannya berlangsung dalam hitungan detik, tidak menimbulkan nyeri, dan mengurangi kebutuhan pengambilan darah untuk penapisan (Kucukoglu Keser et al., 2025). Rancangan TcB berbiaya rendah berbasis mikrokontroler juga mulai dikembangkan untuk memperluas akses (Sayyad et al., 2023). Seiring meluasnya penggunaan TcB, penelitian dalam beberapa tahun terakhir tidak lagi mempersoalkan apakah TcB dapat digunakan, tetapi seberapa andal hasilnya pada kondisi klinis yang berbeda.

Studi pada 102 bayi cukup bulan di Slovakia dan 130 neonatus Melayu di Malaysia sama-sama menunjukkan korelasi yang kuat antara JM-105 dan TSB (r = 0,80-0,95), yang berarti hasil TcB naik dan turun seiring dengan TSB pada populasi yang berbeda (Lucanova et al., 2021a; Mohamed et al., 2022). Namun, kedua studi justru menemukan selisih yang berlawanan arah: pada bayi di Slovakia, angka TcB umumnya 1,1-1,8 mg/dL lebih tinggi daripada TSB, tetapi lebih rendah ketika TSB melebihi 15 mg/dL, sedangkan pada neonatus Melayu angka TcB umumnya 0,5-0,6 mg/dL lebih rendah. Artinya, perangkat yang sama dapat meleset ke arah yang berbeda bergantung pada populasi, lokasi ukur, dan kadar bilirubin, sehingga perangkat TcB perlu divalidasi pada populasi setempat sebelum digunakan secara luas.

Meskipun angkanya tidak selalu tepat, TcB tetap efektif sebagai alat penyaring. Sebuah studi di Slovakia pada 102 neonatus cukup bulan (usia gestasi 37-41 minggu, usia 9-111 jam) mengukur TcB

dengan JM-105 di tiga lokasi, yaitu dahi, sternum, dan abdomen, lalu membandingkannya dengan TSB yang diambil dalam 10 menit setelah pengukuran (Lucanova et al., 2021). Dengan ambang TcB 11,5 mg/dL untuk mendeteksi TSB di atas 15 mg/dL, sensitivitasnya 94,4% di dahi, 100% di sternum, dan 88,9% di abdomen, sedangkan spesifisitasnya 65,5%, 60,7%, dan 66,7%.

Perkembangan berikutnya adalah perbandingan langsung antarperangkat. Studi prospektif yang membandingkan BiliCare, JM-105, dan MBJ20 menunjukkan bahwa ketiganya memiliki kinerja yang baik, tetapi berbeda dalam besarnya bias terhadap TSB. BiliCare menunjukkan bias terkecil, sedangkan JM-105 dan MBJ20 cenderung memberikan nilai lebih rendah pada kadar tinggi (Kucukoglu Keser et al., 2025). Temuan ini sejalan dengan pola pada studi lain, yaitu bahwa TcB cenderung memberikan nilai lebih rendah daripada TSB ketika kadar bilirubin tinggi (Lucanova et al., 2021a). Temuan tersebut menjadi dasar bahwa konfirmasi serum tetap diperlukan di dekat ambang terapi (Kemper et al., 2022; Kucukoglu Keser et al., 2025).

Adapun akurasi hasil pengukuran TcB dipengaruhi oleh empat faktor utama, yaitu:

a.) Lokasi pengukuran. Dahi dan sternum merupakan lokasi yang paling banyak digunakan pada bayi cukup bulan, dengan kinerja yang berbeda antarlokasi (Lucanova et al., 2021a). Selama fototerapi, pemilihan lokasi juga menentukan akurasi (Ho et al., 2021). Pada bayi prematur, area interskapular dilaporkan memberikan kesesuaian terbaik (Gaur & Fatma, 2026).
b.) Fototerapi. Cahaya fototerapi mengubah bilirubin di kulit melalui fotoisomerisasi sehingga kulit tampak memucat dan TcB memberikan nilai lebih rendah daripada TSB. Pengukuran pada kulit yang ditutup pelindung cahaya terbukti lebih akurat (İşleyen et al., 2023). Akurasi terbaik pascafototerapi dicapai sekitar 30 menit setelah lampu dimatikan (Ho et al., 2021). Selama fototerapi, pemantauan tren serial lebih bermakna daripada satu nilai tunggal .
c.) Usia gestasi. Akurasi TcB lebih rendah pada bayi prematur, sehingga interpretasinya pada bayi prematur akhir memerlukan penyesuaian (Akuamoah-Boateng et al., 2022; Gaur & Fatma, 2026)
d.) Faktor keempat adalah pigmentasi kulit. Evaluasi in vitro sistematis menunjukkan bahwa kulit yang lebih gelap menyebabkan TcB memberikan nilai lebih rendah, terutama pada kadar bilirubin tinggi (Dam-Vervloet et al., 2024). Validasi pada populasi spesifik, misalnya neonatus Melayu, tetap diperlukan sebelum perangkat diadopsi secara luas (Mohamed et al., 2022). Pendekatan pembelajaran mesin yang menggabungkan nilai TcB dengan data klinis dilaporkan mampu menurunkan galat estimasi hingga sekitar 25%, meskipun hasil ini masih berasal dari tahap pengembangan model (Morimoto et al., 2024).

Pencitraan Kamera menggunakan Telepon Pintar

Aplikasi telepon pintar memanfaatkan kamera untuk memotret kulit atau sklera bayi. Fitur warna dari citra tersebut kemudian diolah dengan model regresi atau pembelajaran mesin untuk menaksir kadar bilirubin. Studi validasi melaporkan korelasi sedang hingga kuat dengan TSB, dengan r = 0,77–0,90, serta sensitivitas dan spesifisitas yang tinggi untuk mendeteksi hiperbilirubinemia bermakna (Shen et al., 2025; Zhao et al., 2026). Angka tersebut dihimpun dari dua studi dengan populasi, perangkat, dan ambang diagnostik yang berbeda sehingga tidak mewakili kinerja satu aplikasi tertentu. Salah satu studi yang melakukan meta-analisis juga menunjukkan bahwa kinerja aplikasi untuk penapisan sebanding dengan TcB (Hegde et al., 2023).

Pendekatan berbasis telepon pintar pun semakin beragam. Pada awalnya, pengembangan berfokus pada satu bagian tubuh, misalnya aplikasi berbasis sklera yang telah divalidasi untuk penapisan bayi kuning di Ghana (Enweronu-Laryea et al., 2022). Pendekatan berikutnya menggabungkan informasi dari kulit dan sklera sekaligus, seperti kerangka Lumicare yang dirancang sebagai sistem pencitraan optik berbiaya rendah (Oni et al., 2026). Selain dari sisi akurasi, kesiapan aplikasi untuk digunakan secara klinis juga mulai diperhatikan, sebagaimana didokumentasikan dalam pengembangan bertahap sebuah sistem telepon pintar hingga memperoleh sertifikasi sebagai perangkat medis (Aune et al., 2023) .

Jika aplikasi telepon pintar umumnya mengukur pada satu waktu tertentu saat bayi diperiksa, perkembangan terbaru mengarah pada pemantauan yang berlangsung terus-menerus. Salah satunya adalah sistem berbasis kamera RGB yang dipasang di unit perawatan intensif neonatal. Kamera ini merekam warna kulit bayi tanpa henti, sehingga kadar bilirubin dapat ditaksir tanpa menyentuh bayi dan tanpa mengganggu perawatan (Shu et al., 2026) .

Meskipun demikian, pendekatan berbasis kamera, baik pada telepon pintar maupun kamera kontinu, masih menghadapi keterbatasan yang bersifat fisis dan teknis. Warna kulit yang terekam dapat berbeda antar merek telepon karena setiap produsen menggunakan sensor kamera dan pengolahan citra bawaan yang berbeda (Abebe et al., 2021). Selain itu, hasil pengukuran mudah dipengaruhi oleh kondisi pencahayaan di sekitar bayi. Akurasinya juga cenderung lebih rendah pada bayi prematur dan pada bayi yang baru menjalani fototerapi (Ustun et al., 2023).

Pemantauan Kontinu Berbasis IoT

Sistem berbasis IoT menghubungkan sensor bilirubin, jaringan nirkabel, dan unit fototerapi dalam satu sistem pemantauan dan kendali. Data bilirubin dikirim secara waktu nyata, lalu intensitas atau durasi fototerapi dirancang agar dapat disesuaikan secara otomatis sesuai kebutuhan setiap bayi (Raghavendran et al., 2024). Konsep yang sama diterapkan pada selimut fototerapi (*biliblanket*) berbasis IoT untuk perawatan yang lebih portabel (Sojobi et al., 2025).

Status bukti sistem-sistem tersebut perlu dibedakan dengan jelas. Sistem fototerapi terkendali sensor dan selimut fototerapi berbasis IoT masih berupa purwarupa rekayasa yang dilaporkan dalam prosiding konferensi dan belum melalui validasi klinis pada bayi (Raghavendran et al., 2024; Sojobi et al., 2025). Pemantauan kontinu berbasis kamera RGB telah mencapai tahap uji kelayakan pada neonatus (Shu et al., 2026), tetapi belum divalidasi dalam uji klinis berskala besar. Di antara teknologi non-invasif berbasis kamera yang dikaji, sistem penapisan berbasis telepon pintar yang telah dilaporkan melalui validasi hingga sertifikasi sebagai perangkat medis (Aune et al., 2023). Dengan demikian, kendali fototerapi otomatis belum dapat dianggap layak untuk penggunaan rutin. Hambatan menuju tahap tersebut meliputi kebutuhan validasi klinis, infrastruktur, integrasi alur kerja, dan persetujuan regulasi (Aune et al., 2023; Raghavendran et al., 2024).

PEMBAHASAN

Interpretasi Fisis Sumber Bias

TcB cenderung memberikan nilai lebih rendah daripada TSB pada kadar bilirubin tinggi, seperti dilaporkan pada studi perbandingan perangkat (Kucukoglu Keser et al., 2025) dan studi lokasi ukur JM-105 (Lucanova et al., 2021a). Kecenderungan ini kemungkinan besar merupakan hasil gabungan beberapa faktor, bukan satu mekanisme tunggal. Dari sisi optik, Persamaan (1) memperkirakan bahwa respons reflektansi terhadap kenaikan bilirubin dapat menjadi kurang linear ketika serapan pada pita biru sudah tinggi. Namun, besarnya efek ini bergantung pada desain optik dan panjang gelombang setiap perangkat dan belum dikuantifikasi secara langsung dalam studi yang dikaji, sehingga perlu dipandang sebagai hipotesis. Dari sisi fisiologis, kadar bilirubin di kulit tidak selalu seimbang dengan kadar di plasma, terutama ketika kadar serum naik dengan cepat. Distribusi bilirubin ke jaringan juga dipengaruhi oleh usia gestasi, ketebalan kulit, dan ikatan bilirubin dengan albumin. Dari sisi algoritma, setiap perangkat menggunakan persamaan kalibrasi empiris yang dikembangkan dari populasi tertentu. Bila data kalibrasi lebih banyak berisi kadar rendah hingga sedang, estimasi pada kadar tinggi dapat cenderung tertarik ke arah nilai rerata.

Fototerapi memperparah persoalan tersebut. Cahaya fototerapi lebih dahulu mengurai bilirubin di lapisan kulit yang terpapar, sementara bilirubin di dalam darah belum banyak berubah. Akibatnya, kulit tampak lebih pucat daripada kondisi sebenarnya. Hal ini menjelaskan mengapa pengukuran pada kulit yang ditutup dan pemberian jeda waktu setelah fototerapi menghasilkan angka yang lebih akurat (Ho et al., 2021; İşleyen et al., 2023).

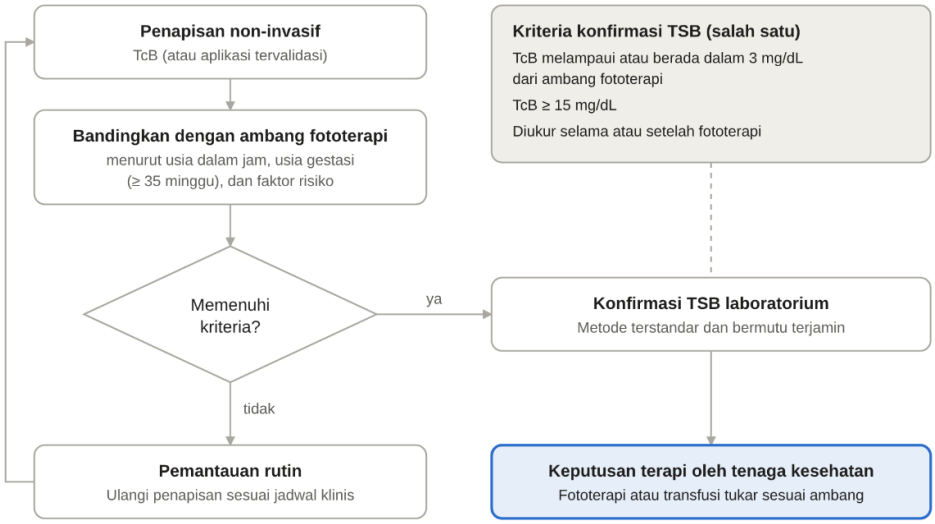
Pengaruh warna kulit juga berakar pada sifat cahaya. Melanin, pigmen yang membuat kulit lebih gelap, menyerap cahaya pada panjang gelombang yang sama dengan bilirubin, sehingga keduanya sulit dibedakan oleh alat (Dam-Vervloet et al., 2024). Karena sumber masalahnya bersifat fisis, koreksi melalui perangkat lunak saja kemungkinan belum cukup. Diperlukan cara pengukuran yang mampu memisahkan sinyal dari lapisan kulit luar dan lapisan kulit yang lebih dalam, misalnya spektroskopi reflektansi difus beresolusi spasial yang berlandaskan Persamaan (2).

Di sisi lain, terdapat kekurangan ada aplikasi telepon pintar yakni sumber ketidakpastiannya menjadi bertambah. Kamera telepon pada dasarnya dirancang untuk menghasilkan foto, bukan untuk mengukur warna secara presisi. Kamera hanya merekam tiga kanal warna, yaitu merah, hijau, dan biru, dan setiap merek mengolah warna dengan caranya sendiri (Abebe et al., 2021). Hal ini menyebabkan kinerja aplikasi berbeda pada perangkat yang berbeda (Hegde et al., 2023; Ustun et al., 2023). Untuk

mengatasinya, pengembang menggunakan kartu kalibrasi warna saat pemotretan serta melatih model pembelajaran mesin dengan data dari bayi berbagai etnis (Aune et al., 2023; Oni et al., 2026).

Posisi Teknologi dalam Alur Penapisan Klinis

Perbedaan kinerja setiap teknologi yang telah diuraikan di atas berimplikasi pada cara teknologi digunakan dalam praktik. Gambar 2 menunjukkan alur penapisan bertingkat yang diadaptasi dari pedoman *American Academy of Pediatrics* untuk bayi dengan usia gestasi 35 minggu atau lebih. Dalam pedoman tersebut, ambang fototerapi ditentukan berdasarkan usia bayi dalam jam, usia gestasi, dan ada atau tidaknya faktor risiko neurotoksisitas. Pemeriksaan TSB dianjurkan bila nilai TcB melampaui atau berada dalam rentang 3 mg/dL dari ambang fototerapi, atau bila TcB mencapai 15 mg/dL atau lebih (Kemper et al., 2022). Kriteria tersebut dirumuskan untuk bilirubinometer transkutan; untuk aplikasi telepon pintar, ambang rujukan perlu mengikuti hasil validasi masing-masing aplikasi. Pengukuran selama atau setelah fototerapi juga memerlukan konfirmasi TSB karena kulit yang terpapar cahaya memucat lebih cepat daripada penurunan bilirubin di darah (Ho et al., 2021; İşleyen et al., 2023).



Gambar 2. Ilustrasi alur penapisan bertingkat ikterus neonatorum untuk bayi dengan usia gestasi ≥ 35 minggu, diadaptasi dari Kemper et al. (2022).

Seperti terlihat pada Gambar 2, cukup satu kriteria terpenuhi untuk menentukan bahwa bayi perlu diperiksa TSB. Bayi yang tidak memenuhi kriteria apa pun cukup dipantau secara rutin tanpa perlu diambil darahnya. Dengan cara ini, teknologi non-invasif membantu menghindarkan banyak bayi dari pengambilan darah yang sebenarnya tidak perlu, sementara keputusan terapi tetap didasarkan pada hasil pemeriksaan darah. Meskipun demikian, Gambar 2 merupakan ilustrasi konseptual, bukan protokol klinis universal. Kriteria di dalamnya berlaku untuk bayi dengan usia gestasi ≥ 35 minggu dan untuk bilirubinometer transkutan, harus dibaca bersama nomogram ambang fototerapi menurut usia bayi dalam jam dan faktor risiko neurotoksisitas, serta penerapannya tetap memerlukan penilaian tenaga kesehatan dan penyesuaian dengan pedoman yang berlaku di setiap negara (Kemper et al., 2022).

Kesetaraan Akses dan Standardisasi

Hal lain yang juga penting adalah pada aspek kesetaraan. Sebuah studi di Inggris menemukan bahwa bayi kulit hitam lebih jarang menjalani pemeriksaan bilirubin karena penilaian visual kurang peka pada kulit gelap (Dann et al., 2026). Teknologi dengan bias pigmentasi berisiko memperlebar kesenjangan ini bila tidak dikoreksi. Di sisi lain, alat yang murah dan sudah tervalidasi, seperti aplikasi telepon pintar dan perangkat uji di titik layanan, berpeluang menjangkau bayi di daerah yang tidak memiliki laboratorium memadai (Enweronu-Laryea et al., 2022; Sundaram et al., 2025). Bagi negara dengan sebaran fasilitas kesehatan yang belum merata seperti Indonesia, gabungan antara penapisan berbasis telepon pintar dan rujukan pemeriksaan TSB yang terarah merupakan pilihan yang realistis.

Terdapat persoalan juga pada aspek standardisasi. Alat non-invasif dikalibrasi dengan membandingkannya terhadap hasil TSB, padahal hasil TSB sendiri dapat berbeda dari antar

laboratorium (Thomas et al., 2022; Xiao et al., 2026). Artinya, kesalahan di laboratorium dapat ikut terbawa ke setiap alat yang dikalibrasi berdasarkan hasil laboratorium tersebut. Oleh sebab itu, program pemantapan mutu eksternal (Westenberg et al., 2025) dan penyeragaman metode antar laboratorium perlu dibenahi terlebih dahulu.

Keterbatasan Kajian

Kajian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, penelusuran hanya dilakukan pada satu basis data, yaitu Scopus, sehingga studi yang hanya terindeks di basis data lain, seperti PubMed dan IEEE Xplore, mungkin tidak tercakup. Kedua, pembatasan pada publikasi berbahasa Inggris dan periode 2021-2026 berpotensi mengabaikan studi dalam bahasa lain, termasuk studi lokal di Indonesia, serta studi sebelum 2021 yang relevan. Ketiga, sebagai tinjauan naratif, seleksi dan penafsiran literatur bergantung pada penilaian penulis sehingga tidak sepenuhnya bebas dari bias seleksi. Keempat, kualitas metodologis studi tidak dinilai dengan instrumen baku; klasifikasi tahap bukti hanya menunjukkan kematangan teknologi, bukan risiko bias di dalam setiap studi. Kelima, metode pengukuran, populasi, usia gestasi, lokasi ukur, metode pembanding, dan ambang diagnostik sangat beragam antarstudi sehingga angka kinerja tidak dapat dibandingkan langsung maupun digabungkan secara statistik.

KESIMPULAN

Dalam lima tahun terakhir, teknologi pengukuran bilirubin pada bayi baru lahir telah bergeser dari pemeriksaan darah di laboratorium menuju pengukuran berbasis cahaya yang non-invasif dan dapat dilakukan secara simultan. Bilirubinometer transkutan kini menjadi alat penyaring utama karena hasilnya cukup sejalan dengan pemeriksaan darah. Sementara itu, kamera, aplikasi telepon pintar, dan sistem berbasis IoT membuka peluang pemeriksaan hingga ke rumah dan ke daerah yang minim fasilitas. Namun, semua teknologi berbasis cahaya ini menghadapi kendala fisis yang sama: pigmen kulit dan darah ikut menyerap cahaya seperti bilirubin, alat menjadi kurang peka ketika kadar bilirubin sangat tinggi, dan fototerapi membuat kadar bilirubin di kulit tidak lagi mencerminkan kadar di darah.

Karena itu, teknologi non-invasif paling tepat digunakan sebagai penyaring awal, sedangkan pemeriksaan darah tetap diperlukan ketika hasilnya mendekati ambang terapi. Langkah berikutnya bergantung pada penyeragaman kalibrasi laboratorium, pengembangan model fisis dan pembelajaran mesin yang tetap andal pada berbagai warna kulit dan jenis perangkat, pengujian di banyak pusat layanan dengan populasi yang beragam, serta penggunaan penanda risiko kerusakan saraf yang lebih tepat, seperti bilirubin tak terikat *(unbound bilirubin)*. Bagi bidang fisika dan instrumentasi, tantangan ini membuka peluang untuk merancang sensor optik yang lebih akurat.

REFERENSI

Abebe, M. A., Hardeberg, J. Y., Vartdal, G., Hardeberg, J. Y., & Vartdal, G. (2021). Smartphones’ Skin Colour Reproduction Analysis for Neonatal Jaundice Detection. *Journal of Imaging Science and Technology*, *65*(6), 1–15. https://doi.org/10.2352/J.IMAGINGSCI.TECHNOL.2021.65.6.060407

Achaliya, S., Agarwal, S., & Ghate, S. (2026). Neonatal jaundice detection: A comprehensive review of traditional, machine learning, deep learning and emerging approaches. *Intelligence-Based Medicine*, *15*, 100392. https://doi.org/10.1016/J.IBMED.2026.100392

Akuamoah-Boateng, G., Stetson, R. C., Karon, B. S., & Brumbaugh, J. E. (2022). Refining interpretation of transcutaneous bilirubin measurement in newborns born late preterm. *Pediatrics and Neonatology*, *63*(5), 484–488. https://doi.org/10.1016/j.pedneo.2022.05.003

Aune, A., Vartdal, G., Jimenez Diaz, G., Gierman, L. M., Bergseng, H., & Darj, E. (2023). Iterative Development, Validation, and Certification of a Smartphone System to Assess Neonatal Jaundice: Development and Usability Study. *JMIR Pediatrics and Parenting*, *6*(1), e40463. https://doi.org/10.2196/40463

Dam-Vervloet, A. J., Morsink, C. F., Krommendijk, M. E., Nijholt, I. M., van Straaten, H. L. M., Poot, L., & Bosschaart, N. (2024). Skin color influences transcutaneous bilirubin measurements: a systematic in vitro evaluation. *Pediatric Research 2024 97:5*, *97*(5), 1706–1710. https://doi.org/10.1038/s41390-024-03081-y

Dann, S. A., Kenyon, S., Adams, D., Bryer, J., Cheatham, C., Crothers, H., Halpern, L., Heap, S., Holder, G., Reeves, K., Remsing, S., Skrybrant, M., Smith, D., Walker, A., Webster, R., & Taylor, B. (2026). Understanding community detection, testing and management of neonatal

jaundice in term infants in the UK: a mixed methods study. *Midwifery*, *156*, 104738. https://doi.org/10.1016/J.MIDW.2026.104738

Enweronu-Laryea, C., Leung, T., Outlaw, F., Brako, N. O., Insaidoo, G., Hagan-Seneadza, N. A., Ani-Amponsah, M., Nixon-Hill, M., & Meek, J. (2022). Validating a Sclera-Based Smartphone Application for Screening Jaundiced Newborns in Ghana. *Pediatrics*, *150*(1). https://doi.org/10.1542/PEDS.2021-053600/188240

Gaur, B. K., & Fatma, A. (2026). Does the Site of Measurement Affect Diagnostic Accuracy of Transcutaneous Bilirubin in Preterm Neonates? A Prospective Study From India. *Journal of Paediatrics and Child Health*, *62*(6), 998–1007. https://doi.org/10.1111/JPC.70383;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

Hegde, D., Rath, C., Amarasekara, S., Saraswati, C., Patole, S., & Rao, S. (2023). Performance of smartphone application to accurately quantify hyperbilirubinemia in neonates: a systematic review with meta-analysis. *European Journal of Pediatrics 2023 182:9*, *182*(9), 3957–3971. https://doi.org/10.1007/S00431-023-05073-2

Ho, S. R., Lin, Y. C., & Chen, C. N. (2021). The Impact of Phototherapy on the Accuracy of Transcutaneous Bilirubin Measurements in Neonates: Optimal Measurement Site and Timing. *Diagnostics 2021, Vol. 11, Page 1729*, *11*(9), 1729. https://doi.org/10.3390/DIAGNOSTICS11091729

İşleyen, F., Çelik, İ. H., Demirel, N., Erçel, N. Ö., Işık, D. U., & Baş, A. Y. (2023). Transcutaneous bilirubin measured on protected skin during phototherapy in term and preterm neonates. *Early Human Development*, *185*, 105858. https://doi.org/10.1016/J.EARLHUMDEV.2023.105858

Kemper, A. R., Newman, T. B., Slaughter, J. L., Maisels, M. J., Watchko, J. F., Downs, S. M., Grout, R. W., Bundy, D. G., Stark, A. R., Bogen, D. L., Holmes, A. V., Feldman-Winter, L. B., Bhutani, V. K., Brown, S. R., Panayotti, G. M. M., Okechukwu, K., Rappo, P. D., & Russell, T. L. (2022). Clinical Practice Guideline Revision: Management of Hyperbilirubinemia in the Newborn Infant 35 or More Weeks of Gestation. *Pediatrics*, *150*(3), 2022058859. https://doi.org/10.1542/PEDS.2022-058859/188726

Krcho, P., Ďurošková, Z., Šemeláková, M., & Urbanská, L. (2026). Comparisons of Optimal Point of Care Bilirubin Testing for Accuracy and Convenience. *Bratislava Medical Journal 2026 127:6*, *127*(6), 2515–2523. https://doi.org/10.1007/S44411-026-00585-3

Kucukoglu Keser, M., Alyamac Dizdar, E., Beser, E., Okman, E., & Sari, F. N. (2025). Comparative Analysis of Transcutaneous Bilirubin Measurement Techniques and Their Agreement With Serum Bilirubin Levels in Neonatal Jaundice: A Prospective Study. *International Journal of Clinical Practice*, *2025*(1), 1688130. https://doi.org/10.1155/IJCP/1688130

Lucanova, L. C., Zibolenova, J., Matasova, K., Docekalova, L., & Zibolen, M. (2021). Accuracy of enhanced transcutaneous bilirubinometry according to various measurement sites. *Turkish Archives of Pediatrics*, *56*(1), 15–21. https://doi.org/10.14744/TURKPEDIATRIARS.2020.54514

Miyabayashi, H., Kubota, Y., Hara, K., Saito, K., Nagano, N., & Morioka, I. (2026). Determinants of unbound bilirubin and clinical utility of the total bilirubin/albumin ratio in neonates. *Pediatric Research 2026*, 1–6. https://doi.org/10.1038/s41390-026-04851-6

Mohamed, M., Ibrahim, N. R., Ramli, N., Majid, N. A., Yacob, N. M., & Nasir, A. (2022). Comparison between the Transcutaneous and Total Serum Bilirubin Measurement in Malay Neonates with Neonatal Jaundice. *The Malaysian Journal of Medical Sciences : MJMS*, *29*(1), 43–54. https://doi.org/10.21315/MJMS2022.29.1.5

Morimoto, D., Washio, Y., Fukuda, K., Sato, T., Okamura, T., Watanabe, H., Yoshimoto, J., Tanioka, M., & Tsukahara, H. (2024). Machine Learning to Improve Accuracy of Transcutaneous Bilirubinometry. *Neonatology*, *121*(6), 772–779. https://doi.org/10.1159/000535970

Oni, F., Olamide, O., & Daramola, N. (2026). LumiCare: A Low-Cost Machine Learning–Based Optical Imaging Framework Integrating Skin and Sclera Features for Non-Invasive Neonatal Hyperbilirubinemia Detection. *Optica Biophotonics Congress 2026 (2026), Paper JM4A.31*, JM4A.31. https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=OCT-2026-JM4A.31

Raghavendran, P. S., Surendar, V., Sheela, A., Krishnaprasath, S., Sridharan, P., Vasanth Raj, N., & Naveenkumar, K. (2024). IOT Enabled Bilirubin Level Monitoring and Controlling Using Photo Therapy. *10th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2024*, 2081–2086. https://doi.org/10.1109/ICACCS60874.2024.10716994

Sayyad, A. J., Aarthi, V. P. M. B., Panga, S. K. R., Thummaluru, V. S., Diwakaran, S., & Ghadiyapudi, A. K. (2023). Non-Invasive Transcutaneous Bilirubinometer Using STM32 - A Review. *2023 International Conference on Next Generation Electronics, NEleX 2023*. https://doi.org/10.1109/NELEX59773.2023.10421483

Shen, G. T., Liu, Y. H., Lin, J. Y., Hsu, K. C., & Chou, H. H. (2025). Development and validation of neonatal jaundice detection using smartphone application. *Computers in Biology and Medicine*, *196*. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2025.110845

Shu, H., Ye, Y., Song, X., & Wang, W. (2026). Feasibility of Camera-Based Continuous Bilirubin Level Monitoring for Neonates. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *73*(1), 103–117. https://doi.org/10.1109/TBME.2025.3577783

Sojobi, J. W., Ogunsanya, A. O., Abdulraheemii, A. A., & Oyegunle, T. S. (2025). Development on an IoT Based Biliblanket for the Treatment of Neonatal Jaundice. *2025 IEEE Connecting the Unconnected Europe, Middle East, and Africa Regional Summit, CTUS-EMEA 2025*. https://doi.org/10.1109/CTUS-EMEA68989.2025.11592227

Sundaram, M., Muthusamy, A., Balachandran, A., & Natarajan, M. (2025). Diagnostic performance of point-of-care bilirubin testing with Bilistick 2.0 device at a South Indian clinical site. *Pediatric Research 2025 99:6*, *99*(6), 2274–2278. https://doi.org/10.1038/s41390-025-04431-0

Thomas, D. H., Warner, J. V., Jones, G. R. D., Chung, J. Z. Y., MacEy, D. J., Screnci, A., & Ryan, J. B. (2022). Total bilirubin assay differences may cause inconsistent treatment decisions in neonatal hyperbilirubinaemia. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, *60*(11), 1736–1744. https://doi.org/10.1515/CCLM-2022-0749/XML

Ustun, H., Oncel, M. Y., Kefeli, M., Akar, M., & Engür, D. (2023). Bilirubin Measurement Through a Smartphone Application in Preterm Infants. *Klinische Padiatrie*, *235*(5), 265–269. https://doi.org/10.1055/A-1816-5878/ID/R1555-0021/BIB

Westenberg, L. E. H., Been, J. V., Tintu, A., Vis, J. Y., Bouma, H. A., Nieboer, D., Dijk, P. H., Groen, H., Poley, M. J., Ista, E., Steegers, E. A. P., Reiss, I. K. M., van der Geest, B. A. M., & Hulzebos, C. V. (2026). Assessing Diagnostic Accuracy of a Handheld Point-of-Care Device for Quantifying Neonatal Bilirubin Levels: The BEAT Jaundice @Home Study. *Neonatology*, 1–10. https://doi.org/10.1159/000551324/946109

Westenberg, L. E. H., van SchrojensteinLantman, M., van Berkel, M., Thelen, M. H. M., Tintu, A., Vis, J. Y., Weykamp, C. W., Oostendorp, M., Frasa, M., Kootstra-Ros, J. E., van der Hagen, E., Schoenmakers, C. H. H., Schenk, P. W., Been, J. V., & Hulzebos, C. V. (2025). Evaluation of Total Bilirubin in a National Quality Program. *Clinical Chemistry*, *72*(1), 183–191. https://doi.org/10.1093/CLINCHEM/HVAF144

Xiao, G., Liu, Y., Hu, J., Wang, Y., Wang, H., & Zhang, S. (2026). Differences in bilirubin measurement results across clinical laboratories. *Accreditation and Quality Assurance 2026 31:3*, *31*(3), 209–219. https://doi.org/10.1007/S00769-026-01706-9

Zhao, Y., Xu, A., Suo, T., Zhang, F., & Chen, M. (2026). Agreement and diagnostic performance of a smartphone-based bilirubin assessment tool for screening neonatal hyperbilirubinemia. *Frontiers in Pediatrics*, *14*, 1852961. https://doi.org/10.3389/FPED.2026.1852961/TEXT