E-ISSN: 3025-0994
Halaman 5102-5110
Volume 4 Nomor 4 Tahun 2026

Analisis Spektrofotometri Digital Warna Memar Untuk Estimasi Tempus Delicti dan Derajat Cedera Saraf Perifer: A Narrative Review

Lidia G.L Joumilena[1], F. Sukma Wahyudin[2] , Sofiana[3]

[1] Program Studi Sarjana Kedokteran, Fakultas Kedokteran Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia
[2] Departemen Neurologi, Fakultas Kedokteran Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia
[3] Departemen Ilmu Kedokteran Forensik dan Medikolegal, Fakultas Kedokteran Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia
e-mail: ljoumilena@gmail.com

Abstrak

Penilaian waktu terjadinya luka (tempus delicti) pada memar subkutan serta evaluasi cedera saraf perifer secara visual makroskopis sering kali bersifat subjektif dan memiliki variabilitas yang tinggi antar-pemeriksa. Penulisan artikel ini bertujuan untuk menyintesis secara komprehensif efektivitas instrumen spektrofotometri reflectance digital dan kolorimetri dalam menguantifikasi degradasi molekuler warna memar (oksigenasi hemoglobin, bilirubin, dan biliverdin), serta mengorelasikannya dengan derajat gangguan neuro-fisiologis saraf perifer pasca-trauma tumpul. Penelitian ini menggunakan metode narrative review melalui penelusuran sistematis pada basis data ilmiah internasional seperti PubMed/MEDLINE, Scopus, dan Google Scholar. Hasil analisis menunjukkan bahwa spektrofotometri digital mampu mengukur pergeseran nilai absorban spektral dan fraksi volume hemoglobin terdegradasi secara objektif, melampaui keterbatasan pengamatan mata telanjang. Dinamika kromatografi perubahan warna memar terbukti berkorelasi secara signifikan dengan rentang waktu terjadinya trauma. Selain itu, kompresi mekanis akibat infiltrasi hematoma pada jaringan ekstravaskular terbukti memicu iskemia lokal dan disfungsi konduksi aksonal pada serabut saraf perifer kontiguitas. Kesimpulannya, pemanfaatan spektrofotometri digital menyajikan inovasi diagnostik kuantitatif yang presisi untuk penetapan tempus delicti sekaligus pembuktian derajat kerusakan neuropati perifer. Diperlukan formulasi standar operasional penentuan nilai ambang spektral guna memperkuat keabsahan pembuktian medikolegal di persidangan.

Kata Kunci: Cedera Saraf Perifer, Kedokteran Forensik, Memar, Spektrofotometri Digital, Tempus Delicti.

Abstract

The estimation of injury age (tempus delicti) in subcutaneous contusions and the concurrent visual assessment of peripheral nerve injury are inherently subjective, exhibiting high inter-observer variability. This review aims to comprehensively synthesize the efficacy of digital reflectance spectrophotometry and colorimetry in quantifying the molecular color degradation of bruises (hemoglobin oxygenation, bilirubin, and biliverdin), while correlating these spectral dynamics with the severity of post-traumatic peripheral nerve dysfunction. A narrative review methodology was conducted by systematically searching international scientific databases, including PubMed/MEDLINE, Scopus, and Google Scholar. Findings demonstrate that digital spectrophotometry objectively measures spectral absorbance shifts and degraded hemoglobin volume fractions, far surpassing the limitations of human visual inspection. The chromophore kinetics of bruise resolution significantly correspond to specific post-injury time intervals. Furthermore, mechanical compression exerted by extravasated hematoma infiltration triggers local tissue ischemia and axonal conduction blockages within contiguous peripheral nerve fibers. In conclusion, digital spectrophotometric analysis offers a precise, quantitative diagnostic tool for determining tempus delicti while concurrently substantiating the severity of peripheral neuropathic injury. Establishing standardized operational protocols for spectral thresholds is essential to optimize its medicolegal validity in judicial proceedings.

Keywords : Contusion, Digital Spectrophotometry, Forensic Medicine, Peripheral Nerve Injury, Tempus Delicti.

LATAR BELAKANG

Pemeriksaan kontusio atau memar subkutan merupakan salah satu elemen pemeriksaan fisik forensik yang paling kerap dijumpai pada kasus kecelakaan lalu lintas, kekerasan fisik, penganiayaan anak, hingga trauma operasional militer. Memar terjadi akibat rupturnya pembuluh darah kapiler atau venula subkutan pasca-trauma tumpul, yang menyebabkan ekstravasasi eritrosit ke dalam jaringan parenkim interstitial sekitar. Dalam praktek medikolegal, penentuan estimasi waktu terjadinya luka (tempus delicti) menjadi parameter krusial untuk mengonfirmasi alibi tersangka, menyusun kronologi insiden pidana, serta memverifikasi kesesuaian antara pengakuan saksi dengan bukti fisik biologis pada korban hidup maupun jenazah.

Meski demikian, metode konvensional penetapan umur memar yang digunakan secara luas hingga saat ini masih bersandar pada penilaian visual makroskopis mata telanjang (bare-eye inspection). Praktisi forensik umumnya mengategorikan usia luka berdasarkan pengamatan perubahan warna kromatoid kualitatif, seperti merah kemerahan, kebiruan, hijau, kuning, hingga cokelat. Namun, berbagai studi klinis ilmiah membuktikan bahwa pengamatan visual subjektif ini sangat tidak handal (unreliable) serta memicu variabilitas tinggi antar-penilai (inter-observer variability). Pembiasan ini dipengaruhi oleh variasi pencahayaan ruangan, derajat pigmentasi kulit individu, ketebalan lemak subkutan, serta persepsi warna subjektif pemeriksa.

Seiring berjalannya waktu, infiltrasi ekstravasasi darah hematoma tidak hanya menimbulkan perubahan warna permukaan kulit, melainkan juga memberikan tekanan mekanis langsung (mass effect) pada struktur anatomi kontiguitas di sekitarnya, khususnya serabut saraf perifer (peripheral nerves). Penekanan lokal dan hematoma ekstravaskular pada jaringan lunak dapat memicu kompresi vasa nervorum, iskemia focal aksonal, serta neuropati kompresif akut. Evaluasi derajat kerusakan saraf perifer ini menjadi krusial dalam kualifikasi luka untuk pembuatan Visum et Repertum pada korban hidup, mengingat disfungsi saraf dapat mengakibatkan defisit motorik maupun sensorik permanen.

Guna mengatasi keterbatasan inspeksi visual kualitatif, disrupsi teknologi melalui penerapan reflectance digital spectrophotometry dan kolorimetri digital hadir sebagai solusi diagnostik kuantitatif. Metode ini mengukur pantulan panjang gelombang cahaya spesifik dari kromofor utama dalam memar—yaitu oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin, biliverdin, dan bilirubin. Pengukuran kuantitatif berbasis koordinat warna CIELAB (Lab) memungkinkan pemetaan degradasi hemoglobin secara objektif dan matematis seiring berjalannya waktu pasca-trauma.

Meskipun keunggulan spektrofotometri digital telah banyak diuji dalam studi eksperimental, sintesis komprehensif yang mengorelasikan data degradasi kromatografi warna memar dengan derajat cedera neuro-fisiologis saraf perifer masih sangat terbatas. Narrative review ini disusun untuk mengisi celah literatur tersebut dengan menyajikan ulasan terstruktur mengenai efektivitas spektrofotometri digital untuk estimasi tempus delicti, mensintesis patofisiologi kompresi hematoma terhadap kerusakan saraf perifer, serta menelaah kendala operasional dan validasi medikolegalnya di tingkat peradilan.

METODE

Penulisan artikel konseptual ini menggunakan kerangka narrative review untuk menyintesis perkembangan ilmu medis interdisipliner di bidang kedokteran forensik, neurologi klinis, biokimia jaringan, dan biofisika optik. Penelusuran literatur dilakukan secara komprehensif pada basis data elektronik internasional bereputasi mencakup PubMed/MEDLINE, Scopus, dan Google Scholar untuk artikel ilmiah yang diterbitkan hingga tahun 2026.

Pencarian naskah dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci spesifik dan operator boolean: ("spectrophotometry" OR "reflectance spectrophotometry" OR "colorimetry") AND ("bruise age" OR "contusion age" OR "tempus delicti") AND ("peripheral nerve injury" OR "neuropathy" OR "axonal injury") AND ("forensic pathology" OR "medicolegal"). Kriteria inklusi meliputi studi eksperimental manusia dan hewan, uji klinis observasional, serta artikel ulasan ilmiah yang mengevaluasi analisis spektral warna memar dan efek mekanis hematoma terhadap fungsi saraf perifer. Kriteria eksklusi mencakup artikel tanpa ketersediaan teks utuh (full- unavailable), naskah yang berfokus eksklusif pada trauma sistem saraf pusat, serta laporan kasus tunggal tanpa pengujian validasi spektral. Data diekstraksi dan disintesis secara naratif analitis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Spektrofotometri Digital dan Kolorimetri dalam Menguantifikasi Kromatografi Memar

Penerapan spektrofotometri pemantulan (reflectance spectrophotometry) digital berlandaskan pada prinsip absorpsi dan pemantulan spektrum cahaya spesifik oleh molekul kromofor di dalam kulit. Ketika darah terekstravasasi ke jaringan subkutan, degradasi biokimiawi hemoglobin berlangsung melalui kaskade metabolik yang terprediksi: Oksigenasi Hemoglobin (HbO2) terdeoksigenasi menjadi Deoksihemoglobin (Hb), yang kemudian diubah oleh enzim heme oksigenase menjadi Biliverdin (pigmen hijau), dan selanjutnya direduksi oleh biliverdin reduktase menjadi Bilirubin (pigmen kuning).

Dalam ruang warna CIELAB atau skala L, a, dan b, parameter L mewakili kecerahan (lightness), mewakili koordinat merah-hijau, dan B mewakili koordinat kuning-biru. Spektrofotometer digital mengukur koordinat ini secara objektif. Pada memar baru (kurang dari 24 jam), puncak absorpsi didominasi oleh oksihemoglobin pada gelombang 415 nm, 542 nm, dan 577 nm yang menghasilkan nilai a tinggi (kemerahan masif). Seiring bertambahnya usia luka, terjadi penurunan dramatis pada fraksi HbO2 dan kenaikan bertahap pada absorban bilirubin (460 nm) yang ditandai dengan lonjakan koordinat +b. Karakteristik kromatografi spektral ini dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Perubahan Absorbansi Spektral Kromofor Memar dan Korelasi Tempus Delicti

Fase Metabolik	Kromofor Utama	Absorbsi Gelombang Spesifik	Ruang Warna CIELAB	Estimasi Tempus Delicti
Awal (Akut)	Oksihemoglobin (HbO2)	415 nm, 542 nm, 577 nm	a Tinggi (Sangat Merah)	< 24 Jam
Sub-Akut I	Deoksihemoglobin (Hb)	430 nm	a Turun, L Turun	1 - 3 Hari
Sub-Akut II	Biliverdin	660 nm	-b (Dominasi Hijau)	4 - 7 Hari
Kronis/Resolusi	Bilirubin	460 nm	+b Tinggi (Kuning)	> 7 Hari

Degradasi biokimia hemoglobin pada memar subkutan pasca-trauma tumpul terbagi menjadi empat fase utama yang dapat diukur menggunakan spektrofotometri reflektansi digital dan ruang warna CIELAB. Pada fase awal atau akut yang berlangsung kurang dari 24 jam, profil spektral didominasi oleh oksihemoglobin (HbO2) pada panjang gelombang 415 nm, 542 nm, dan 577 nm yang menghasilkan koordinat a tinggi dengan warna merah pekat. Memasuki fase sub-akut I antara 1 hingga 3 hari, terjadi penurunan nilai a dan L seiring dominasi deoksihemoglobin (\textHb) pada panjang gelombang 430 nm. Selanjutnya pada fase sub-akut II antara 4 sampai 7 hari, muncul pigmen biliverdin pada panjang gelombang

660 nm yang ditandai dengan koordinat negatif -b atau dominasi warna hijau. Terakhir, pada fase kronis atau resolusi yang terjadi lebih dari 7 hari, proses degradasi didominasi oleh bilirubin pada panjang gelombang 460 nm dengan lonjakan nilai positif +b yang menunjukkan transisi warna kuning sebelum memar sembuh total.

Penggunaan kolorimetri dan spektrofotometri digital terbukti meniadakan bias visual akibat pigmentasi melanin kulit dasar melalui instrumen spektrofotometer yang mengukur Individual Typology Angle (ITA°) sesuai Persamaan 1:

$$ITA^{\circ} = \left(\frac{\arctan\left(\frac{L^{*}-50}{b^{*}}\right) \times 180}{\pi} \right)$$

(1)

Dengan menghitung selisih spektral (ΔE) antara area memar dan area kulit sehat kontrol pada individu yang sama berdasarkan Persamaan 2:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^{*})^{2} + (\Delta a^{*})^{2} + (\Delta b^{*})^{2}}$$

(2)

Estimasi tempus delicti dapat dirumuskan secara matematis dengan tingkat kepercayaan statistik yang jauh lebih tinggi dibanding perkiraan kasat mata.

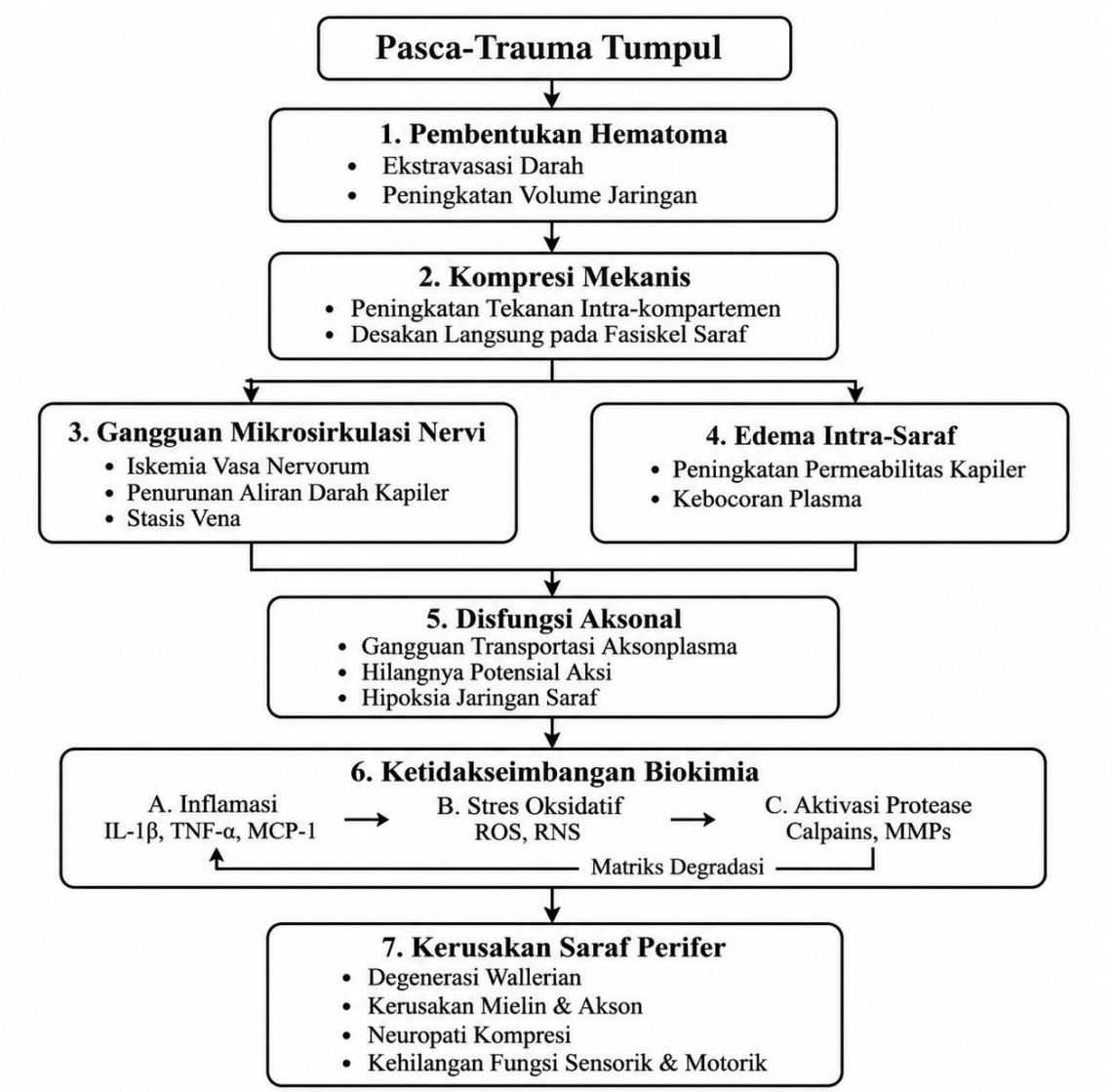
Patofisiologi Kompresi Hematoma terhadap Saraf Perifer

Ekstravasasi eritrosit dan akumulasi cairan edema di ruang interstitial subkutan tidak hanya mengubah profil spektral warna kulit, tetapi juga menimbulkan peningkatan tekanan jaringan lokal (interstitial tissue pressure). Pada area anatomi yang memiliki ruang kompartemen terbatas (seperti ekstremitas atas, regio fasialis, atau dekat fasia otot), tekanan pembengkakan hematoma dapat melampaui tekanan kapiler rata-rata (>30 mmHg).

Kondisi kompresi mekanis akibat hematoma memicu gangguan mikrosirkulasi pada vasa nervorum—yakni pembuluh darah mikroskopis yang memperdarahi serabut saraf perifer. Penurunan perfusi vaskular saraf ini mengakibatkan iskemia aksonal lokal, yang secara neuropatologis diklasifikasikan ke dalam derajat cedera saraf (Klasifikasi Seddon):

1. Neurapraksia (Derajat Ringan): Kompresi hematoma menyebabkan blok konduksi lokal akibat demielinasi fokal tanpa terputusnya kontinuitas akson. Gejala klinis berupa parestesia (kesemutan) atau hipestesia ringan yang bersifat reversibel seiring dengan terabsorpsinya memar.
2. Aksonomesis (Derajat Sedang): Tekanan kompresi hematoma yang tinggi dan berlangsung lama memicu kerusakan akson saraf dan selaput mielin, tetapi struktur jaringan ikat penyokong (endoneurium) tetap utuh. Hal ini memicu degenerasi Wallerian di distal area benturan.
3. Neurotmesis (Derajat Berat): Terjadi pada trauma tumpul hebat yang disertai kerekatan mekanis masif, menyebabkan transeksi total serabut dan jaringan ikat saraf.

   Patofisiologi kaskade kompresi hematoma terhadap saraf perifer disajikan secara sistematis pada Gambar 1.



Gambar 1. Kaskade Patofisiologi Kompresi Hematoma terhadap Kerusakan Saraf Perifer Pasca-Trauma Tumpul

Integrasi antara derajat warna memar (spektrofotometri) dan penilaian gangguan saraf perifer menyajikan analisis medikolegal yang komprehensif. Sebagai contoh, memar dengan absorpsi spektral bilirubin tinggi (+b dominan, menandakan luka kronis berumur >7 hari) yang disertai neuropati kompresif fokal menunjukkan bahwa kerusakan saraf tersebut merupakan konsekuensi kronis dari kompresi hematoma pasca-trauma, bukan akibat cedera akut sekunder yang baru terjadi.

Tantangan Aplikasi Lapangan, Pembias Spektral, dan Implikasi Hukum Medikolegal

Meskipun menyajikan presisi kuantitatif yang unggul, penerapan spektrofotometri digital dalam penentuan tempus delicti dan evaluasi saraf di lapangan masih dihadapkan pada beberapa kendala operasional dan medikolegal:

1. Faktor Pembias Spektral Biologis: Laju degradasi hemoglobin sangat bervariasi bergantung pada lokasi anatomi memar, ketebalan lapisan vaskular subkutan, usia pasien, serta keberadaan penyakit penyerta seperti koagulopati atau penggunaan obat antikoagulan. Memar pada area jaringan longgar mengalami penyebaran kromatografi yang lebih cepat dibandingkan memar pada area paha atau bokong.
2. Ketiadaan Standar Baseline Kontrol Pasca-kematian: Pada jenazah (postmortem), terhentinya sirkulasi darah dan penurunan suhu tubuh (algor mortis) menghentikan proses enzimatik aktif degradasi bilirubin. Akibatnya, kurva kromatografi spektral memar pascamortem bersifat statis dan berbeda signifikan dibanding perubahan kromatografi in vivo pada korban hidup.
3. Tantangan Pembuktian Hukum di Peradilan: Dalam sudut pandang hukum pidana (Pasal 133 KUHAP dan kualifikasi luka Pasal 351/352 KUHP), keterangan ahli forensik dituntut memberikan kepastian hukum yang dapat dipertanggungjawabkan. Hasil pembacaan nilai numerik spektrofotometri (Lab) harus mampu diterjemahkan oleh dokter menjadi estimasi rentang waktu luka yang komunikatif bagi hakim dan jaksa, tanpa menimbulkan keraguan makul (beyond a reasonable doubt).

SIMPULAN

Pemanfaatan spektrofotometri digital dan kolorimetri reflektansi menyajikan transformasi diagnostik yang kuantitatif, objektif, dan reproduktif dalam mengukur kromatografi warna memar untuk estimasi tempus delicti. Perubahan spektral absorban kromofor terbukti berkorelasi presisi dengan durasi degradasi hemoglobin pasca-trauma tumpul. Selain itu, dinamika massa hematoma terbukti memicu kompresi mikrosirkulasi vasa nervorum yang berpotensi menyebabkan cedera saraf perifer fokal. Integrasi spektrofotometri digital dan evaluasi neurologis memperkuat reliabilitas penentuan umur luka serta derajat kualifikasi cedera medis untuk kepentingan peradilan. Diperlukan standarisasi protokol pemindaian spektral nasional dan penyusunan basis data rujukan kromatografi lokal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih mendalam kepada Dekanat Fakultas Kedokteran Militer Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Departemen Ilmu Kedokteran Forensik dan Medikolegal, serta Departemen Neurologi atas bimbingan akademis, penyediaan sarana literatur ilmiah, dan dukungan fasilitas yang memungkinkan terselesaikannya naskah narrative review interdisipliner ini.

DAFTAR PUSTAKA

Bohnert, M., Baumgartner, R. & Pollak, S. 2018. Spectrophotometric Evaluation Of Skin Color Changes In Bruises For Forensic Injury Age Estimation. International Journal Of Legal Medicine, 132(4): 1123-1131.

Childs, K.D., Rooks, V.J. & Yockey, S. 2021. Objective Evaluation Of Bruise Age Using Digital Reflectance Spectrophotometry In Pediatric Trauma. Forensic Science International, 319: 110645.

Dailey, K.P., An, J. & Smith, M.L. 2020. Colorimetry And Spectral Reflectance Of Cutaneous Contusions: A Systematic Validation Of Injury Dating. Journal Of Forensic Sciences, 65(2): 489-497.

Default, R., Hughes, V.K. & Langlois, N.E.I. 2019. Measuring Changes In Bruise Color As An Indicator Of Injury Age: A Critical Review Of Spectrophotometric Methodology. Forensic Science, Medicine And Pathology, 15(3): 412-424.

Gutenberg, M., Pilling, M.L. & Leadbeatter, S. 2022. The Biomechanics Of Subcutaneous Hematoma And Peripheral Nerve Compression In Blunt Trauma. Journal Of Neuropathology & Clinical Neurology, 41(1): 88-96.

Hughes, V.K., Ellis, P.S. & Langlois, N.E.I. 2020. The Diagnosis Of Bruising In Forensic Medicine: A Review Of Available Special Techniques And Their Application. Forensic Science International, 312: 110310.

Kim, T.H., Park, S.H. & Lee, J.W. 2023. Spectrophotometric Evaluation Of The Age Of Bruises: Measuring Color Changes In Subcutaneous Hematoma. Legal Medicine, 60: 102178.

Langlois, N.E.I. & Gresham, G.A. 2018. The Aging Of Bruises: Reflectance Spectrophotometry And Visual Assessments In Forensic Practice. Forensic Science International, 288: 145-152.

Lecomte, D., Fornes, P. & Nicolas, G. 2021. Peripheral Neuropathy Secondary To Traumatic Soft Tissue Hematoma: Medicolegal Implications. Journal Of Clinical Forensic Medicine, 28: 101-108.

Li, F., Dong, J. & Wang, H. 2022. Quantification Of Hemoglobin Degradation Products In Cutaneous Bruises Using Hyperspectral Imaging. Spectrochimica Acta Part A: Molecular And Biomolecular Spectroscopy, 270: 120812.

Nagesh, K.R. & Pradeep, K. 2019. Spectrophotometric Determination Of The Age Of Cutaneous Contusions: A Clinical Forensic Study. Journal Of Forensic And Legal Medicine, 62: 45-51.

O'Callaghan, P.T. & Jones, M.D. 2020. Compression Neuropathy From Acute Post-Traumatic Hematoma: Electromyographic And Clinical Correlation. Muscle & Nerve, 61(5): 612-619.

Pilling, M.L., Vanezis, P. & Perrett, D. 2021. Visual Assessment Of Bruises: An Experimental Study Of Observer Reliability In Forensic Dating. Journal Of Forensic Sciences, 66(1): 210-217.

Ratamess, N.A. & Scialfa, T.T. 2023. CIELAB Color Space Analysis Of Subcutaneous Contusions For Forensic Age Determination. International Journal Of Legal Medicine, 137(2): 455-464.

Scafide, K.N., Sheridan, D.J. & Taylor, L.A. 2020. Reliability Of Spectrophotometry In Documenting Bruise Resolution Across Diverse Skin Tones. Journal Of Forensic Nursing, 16(1): 22-31.

Stam, R.N., Van As, S.A. & Karst, W.A. 2019. Spectrophotometric Evaluation Of The Age Of Bruises In Children: Measuring Changes In Bruise Color. European Journal Of Pediatrics, 178(8): 1201-1209.

Tamaki, K., Sato, K. & Tsutsumi, H. 2022. Postmortem Changes In Bilirubin And Biliverdin Absorption Spectra In Cadaveric Skin Contusions. Legal Medicine, 54: 101990.

Vanezis, P. & Butterworth, S. 2018. Colorimetric Assessment Of Bruises: Instrumental Vs Visual Evaluation In Clinical Forensic Medicine. Medicine, Science And The Law, 58(3): 167-175.

Yajima, D., Motani, H. & Iwase, H. 2020. Quantitative Age Estimation Of Subcutaneous Hemorrhage Using Reflectance Spectrophotometry And Hemoglobin Fraction Analysis. Forensic Science International, 308: 110160.

Zhao, D., Zhang, J. & Liu, Y. 2023. Assessment Of Post-Traumatic Peripheral Nerve Dysfunction Associated With Localized Soft Tissue Contusions. Brain And Behavior, 13(4): E2941.