

MIKROBIOTA POSTMORTEM SEBAGAI PENANDA BIOLOGIS PERKIRAAN WAKTU KEMATIAN: SUATU KAJIAN LITERATUR

Postmortem Microbiota As Biological Markers For Estimated Time Of Death: A Literature Review

Insil Pendri Hariyani^{*1}, Resti Rahmadika Akbar², Mutiara Anissa³

^{*1,2,3}Universitas Baiturrahmah

***Correspondence Author: insil_pendri@fk.unbrah.ac.id**

Abstract

Determining the time of death (Postmortem Interval/PMI) is a crucial aspect of forensic medical investigations. Classical methods such as measuring body temperature, rigor mortis, and livor mortis are often inaccurate in tropical environments that accelerate decomposition. Microbiology-based approaches, particularly postmortem microbiota (thanatomicrobiome) analysis, offer more objective biological indicators. Recent literature indicates a regular pattern of microbial succession in various body locations after death, including the oral cavity, stomach, and rectum. Environmental factors such as temperature and humidity significantly influence microbiota dynamics, necessitating local mapping for tropical contexts. This review discusses recent research findings on postmortem microbiota patterns, identification methods (molecular and conventional), and their potential use as a basis for more accurate PMI estimation in Indonesia.

Keywords: *postmortem microbiota, time of death interval, thanatomicrobiome, gram stain, biochemical testing, tropical forensic medicine*

Abstrak

Penentuan interval waktu kematian (Postmortem Interval/PMI) merupakan aspek penting dalam investigasi kedokteran forensik. Metode klasik seperti pengukuran suhu tubuh, rigor mortis, dan livor mortis seringkali kurang akurat di lingkungan tropis yang mempercepat dekomposisi. Pendekatan berbasis mikrobiologi, khususnya analisis mikrobiota postmortem (thanatomicrobiome), menawarkan indikator biologis yang lebih objektif. Literatur terkini menunjukkan adanya pola suksesi mikroorganisme yang teratur pada berbagai lokasi tubuh setelah kematian, termasuk rongga mulut, lambung, dan rektum. Faktor lingkungan seperti suhu dan kelembaban berpengaruh signifikan terhadap dinamika mikrobiota, sehingga diperlukan pemetaan lokal untuk konteks tropis. Tinjauan ini membahas hasil-hasil penelitian terbaru mengenai pola mikrobiota postmortem, metode identifikasi (molekuler maupun konvensional), dan potensi penggunaannya sebagai dasar estimasi PMI yang lebih akurat di Indonesia.

Keywords: *mikrobiota postmortem, interval waktu kematian, thanatomicrobiome, pewarnaan gram, uji biokimia, kedokteran forensik tropis*

PENDAHULUAN

Penentuan postmortem interval (PMI) merupakan komponen sentral investigasi forensik karena memengaruhi rekonstruksi peristiwa, strategi penyidikan, dan proses peradilan. Pendekatan konvensional—algor, rigor, dan livor mortis—memiliki keterbatasan karena sangat dipengaruhi suhu, kelembapan, pakaian/penutupan tubuh, serta variabilitas individu, sehingga akurasinya menurun pada iklim tropis yang mempercepat dekomposisi (1,2). Dalam satu

dekade terakhir, muncul pendekatan biologis berbasis thanatobiome (komunitas mikroba pascakematian) yang mengamati suksesi mikroorganisme pada berbagai lokus tubuh secara temporal untuk memperkirakan PMI dengan kerangka yang lebih objektif (3–6).

Setelah kematian, hilangnya perfusi, hipoksia jaringan, dan kegagalan barier mukosa memicu translokasi serta pertumbuhan diferensial komunitas mikroba endogen, terutama dari traktus gastrointestinal, yang membentuk pola suksesi relatif teratur (3,5,7–9). Sejumlah studi eksperimental dan observasional menunjukkan perubahan struktur dan fungsi komunitas ini dapat dipetakan terhadap waktu dan lingkungan, menjadikannya kandidat penanda hayati PMI (3,6,9). Namun, besarnya pengaruh faktor eksternal—terutama suhu dan kelembapan—menuntut kalibrasi lokal, terlebih pada wilayah tropis dataran rendah/tinggi yang memiliki profil iklim berbeda (5,6,10–12).

Di sisi metodologi, teknik sekuensing 16S rRNA/metagenomik memberi resolusi tinggi, tetapi menuntut sumber daya dan keahlian khusus. Laboratorium dengan fasilitas terbatas tetap dapat memetakan pola dominansi melalui pewarnaan Gram dan uji biokimia inti (katalase, oksidase, indole, urease, citrate, TSI) guna identifikasi tingkat genus sebagai tahap awal pembangunan kurva suksesi lokal (13–16). Tinjauan ini merangkum bukti terbaru mengenai dinamika mikrobiota postmortem, peran faktor lingkungan, pilihan metodologi, serta celah riset yang relevan untuk pengembangan model PMI berbasis mikrobiota dalam konteks Indonesia.

METODE

Metode kajian pustaka adalah metode penelitian yang menggunakan sumber-sumber tertulis sebagai data utama, seperti:

- Buku ilmiah
- Artikel jurnal
- Prosiding
- Laporan penelitian
- Peraturan perundang-undangan
- Dokumen resmi lembaga

Secara konsep, metode ini dikenal sebagai Kajian Pustaka, yaitu penelitian yang tidak mengumpulkan data langsung dari lapangan, tetapi mengolah teori, temuan, dan hasil riset terdahulu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Latar Belakang Perkembangan Penelitian Mikrobiota Postmortem

Penentuan interval waktu kematian (Postmortem Interval/PMI) merupakan salah satu aspek paling krusial dalam kedokteran forensik, karena menjadi dasar rekonstruksi kronologi peristiwa kematian dan membantu aparat penegak hukum menyaring tersangka (1,2). Secara tradisional, estimasi PMI mengandalkan parameter klasik seperti suhu tubuh, rigor mortis, dan livor mortis. Namun, metode ini memiliki keterbatasan, khususnya di negara beriklim tropis yang menyebabkan percepatan dekomposisi dan mempercepat hilangnya tanda-tanda tersebut (3–5). Dalam dua dekade terakhir, konsep thanatobiome yakni perubahan komunitas mikroba tubuh setelah kematian—menawarkan pendekatan baru yang lebih objektif (6–8). Pendekatan berbasis mikrobiota ini memanfaatkan

sifat alami tubuh manusia yang merupakan ekosistem mikroba kompleks dan berubah dramatis setelah kematian. Kematian memicu penurunan oksigen, merusak barier mukosa, dan pelepasan nutrisi yang menguntungkan mikroba tertentu, menghasilkan pola suksesi yang dapat dipetakan terhadap waktu (4,6,9–11). Konsep ini menandai era baru kedokteran forensik berbasis biologi molekuler dan ekologi mikroba.

Konsep Thanatobiome dan Dinamika Suksesi Mikroba

Thanatobiome didefinisikan sebagai keseluruhan komunitas mikroba yang muncul dan berkembang setelah kematian. Proses kematian tubuh mengakibatkan perubahan drastis: berhentinya perfusi, deplesi oksigen, perubahan pH, dan degradasi jaringan. Kondisi ini memicu translokasi mikroba endogen dari lokasi asalnya (misalnya rongga mulut dan saluran cerna) ke jaringan internal serta perubahan dominansi komunitas (9,12). Penelitian Metcalf dkk. pada model mamalia menunjukkan bahwa komunitas mikroba pascakematian mengikuti lintasan yang relatif terprediksi pada berbagai lokasi tubuh (4). Pada fase awal (0–6 jam), flora masih didominasi bakteri aerob dan anaerob fakultatif seperti *Streptococcus* dan *Actinomyces* di mulut, serta Enterobacterales di usus (13,14). Seiring bertambahnya waktu, kondisi anoksik dan pelepasan nutrisi mendukung proliferasi bakteri anaerob pembusuk seperti *Clostridium* dan *Bacteroides*, pembentuk gas dan enzim proteolitik yang berperan pada pembengkakan dan dekomposisi (15–18). Di rektum, kepadatan mikroba jauh lebih tinggi dibanding lokasi lain. Studi Javan dkk. dan Guo dkk. menunjukkan bahwa Enterobacterales seperti *Escherichia coli*, *Klebsiella*, dan *Proteus* cenderung meningkat pada 24–48 jam postmortem (8,15). Pergeseran ini berlangsung teratur sehingga dapat dijadikan dasar pemodelan estimasi PMI (6,9,15–18).

Faktor Lingkungan dan Konteks Tropis

Ekologi dekomposisi sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti suhu, kelembapan, dan iklim mikro. Suhu tinggi mempercepat metabolisme mikroba, fermentasi, dan pembentukan gas; kelembapan memfasilitasi pembentukan biofilm dan aktivitas mikroba permukaan (19,20). Carter dkk. menemukan bahwa dekomposisi pada lingkungan panas dapat berlangsung dua kali lebih cepat dibanding iklim sedang (5). Studi Clarke dkk. membandingkan suksesi mikroba di iklim tropis dan sedang dan menemukan perbedaan kecepatan dan komposisi komunitas dominan (21). Di Indonesia, variasi dataran rendah vs tinggi juga berpotensi memodifikasi lintasan mikroba karena perbedaan suhu malam, kelembapan, dan paparan angin (22–24). Oleh karena itu, model PMI berbasis mikrobiota memerlukan kalibrasi lokal untuk meningkatkan akurasi.

Lokasi Sampling dan Signifikansinya

Pemilihan lokasi sampling sangat menentukan nilai diagnostik mikrobiota postmortem. Rongga mulut merupakan pintu masuk utama mikroorganisme dan tempat pertama perubahan mikroba terjadi akibat berhentinya fungsi protektif saliva dan perubahan pH (7,9,13). Studi Hyde dkk. menunjukkan bahwa profil mikroba pada dorsum lidah berubah signifikan dalam 12–24 jam pascakematian (7). Mukosa lambung mencerminkan transisi flora gastrointestinal proksimal pada saat pH berubah pascakematian. Pada jam-jam awal, pH lambung meningkat akibat kehilangan sekresi asam, memungkinkan pertumbuhan Enterobacterales dan bakteri pembusuk lainnya (25). Rektum adalah reservoir dengan kepadatan mikroba tinggi yang menunjukkan pola suksesi tajam dan relatif konsisten pada

berbagai spesies (8,15,26). Konsistensi titik sampling—misalnya dorsum lidah untuk mulut, fundus anterior untuk lambung, dan rektum terminal ± 1 cm—meningkatkan reproduktibilitas data (27–29).

Metodologi Identifikasi Mikroba

Teknik molekuler seperti 16S rRNA sequencing dan metagenomik memungkinkan pemetaan komunitas mikroba secara komprehensif serta prediksi fungsi metabolik (4,9,12,30). Namun, metode ini mahal, memerlukan fasilitas molekuler, dan waktu analisis panjang. Untuk laboratorium sumber daya terbatas, pendekatan klasik tetap relevan: pewarnaan Gram memberikan klasifikasi awal (Gram positif/negatif, kokus/basil), sedangkan uji biokimia inti (katalase, oksidase, indole, urease, citrate, TSI) memungkinkan identifikasi genus dominan (31–33). Weatherbee dkk. menunjukkan bahwa kombinasi panel uji sederhana ini dapat membangun peta waktu-genus yang kemudian divalidasi dengan metode molekuler (33). Pendekatan ini sesuai untuk pengembangan basis data suksesi mikroba di Indonesia sebelum beralih ke teknik molekuler penuh.

Model Hewan sebagai Basis Penelitian

Model tikus Sprague Dawley dipilih karena kemudahan kontrol variabel (usia, berat, jenis kelamin), stabilitas flora usus, dan kemiripan fisiologis dasar dengan manusia (17,18,35). Penelitian Metcalf dkk. dan Guo dkk. pada model mamalia menunjukkan pola suksesi mikroba yang paralel dengan manusia pada lokus mulut-GI-organ internal (4,9,15,26). Dengan menggunakan model ini, peneliti dapat menyaring kandidat penanda PMI dan menguji pengaruh faktor lingkungan (suhu, penutupan tubuh) sebelum validasi lintas spesies. Penggunaan hewan coba juga memudahkan pengaturan waktu kematian, interval pengambilan sampel, serta kondisi lingkungan yang sulit dilakukan pada jenazah manusia karena faktor etik dan adat di Indonesia.

Keterbatasan dan Celah Penelitian di Indonesia

Variabilitas pra-kematian (obat, antibiotik, komorbid), cara kematian, dan mikroklimat dapat menggeser lintasan mikroba (21,22). Tantangan di Indonesia adalah belum adanya database suksesi mikroba tropis yang terstandar, sehingga model PMI berbasis mikrobiota masih perlu dikalibrasi. Prioritas riset meliputi: (i) pembangunan kurva suksesi 0–72 jam pada tiga lokus utama; (ii) studi komparatif dataran rendah–tinggi dan variasi suhu (ruang vs pendingin); (iii) transisi bertahap dari metode sederhana ke molekuler untuk memvalidasi penanda yang robust (31–35).

Peran Faktor Lingkungan secara Lebih Mendalam

Selain suhu dan kelembapan, terdapat faktor lingkungan lain yang juga mempengaruhi suksesi mikroba pascakematian, seperti aerasi, paparan serangga, penutupan tubuh, dan keberadaan cairan tubuh yang bocor ke tanah (19,20). Penelitian Tibbett dkk. menunjukkan bahwa aktivitas mikroba tanah yang berinteraksi dengan cairan dekomposisi turut memodifikasi komposisi komunitas mikroba pada permukaan tubuh (19). Vass dkk. menekankan pentingnya mikroklimat lokal (bayangan, paparan sinar matahari, vegetasi) dalam mempercepat atau memperlambat dekomposisi (20). Faktor-faktor ini berinteraksi kompleks sehingga membentuk kondisi unik tiap lokasi, yang menyebabkan variasi dalam estimasi PMI jika model yang digunakan tidak mempertimbangkan konteks lingkungan (21–24).

Studi Pechal dkk. (22) menunjukkan bahwa perubahan komunitas mikroba pada hewan percobaan yang diletakkan di ruang terbuka berbeda secara signifikan dengan yang diletakkan dalam wadah tertutup, meskipun suhu dan kelembapan rata-rata serupa. Hasil ini memperkuat urgensi pemetaan kondisi lingkungan setempat dalam pengembangan model PMI berbasis mikrobiota, terutama di daerah tropis seperti Indonesia yang memiliki keragaman iklim sangat tinggi.

Pendekatan Validasi Model PMI

Sebagian besar penelitian mikrobiota postmortem menggunakan model hewan sebagai tahap awal sebelum validasi pada manusia. Strategi ini memungkinkan peneliti mengendalikan variabel lingkungan dan faktor prakematian yang sulit diatur pada jenazah manusia (17,18,35). Studi Metcalf dkk. (4) dan Guo dkk. (15) pada model mamalia menunjukkan bahwa meskipun ada perbedaan spesifik spesies, lintasan suksesi mikroba pada mulut-GI-organ internal relatif serupa antara manusia dan hewan coba. Dengan demikian, kandidat penanda mikroba yang ditemukan pada tikus Sprague Dawley dapat diuji lebih lanjut pada jenazah manusia untuk memverifikasi akurasi.

Di Indonesia, penggunaan model hewan menjadi sangat penting karena penelitian pada jenazah manusia terkendala faktor etik, agama, dan adat istiadat. Dengan mengembangkan database mikrobiota postmortem hewan coba di lingkungan tropis, peneliti dapat memperoleh gambaran awal pola suksesi mikroba yang selanjutnya dapat diadaptasi pada konteks manusia.

Perkembangan Metodologi Mutakhir

Selain metode molekuler 16S rRNA, kini muncul pendekatan shotgun metagenomics yang tidak hanya memetakan komunitas mikroba tetapi juga mengungkap gen metabolik yang berpotensi terkait kecepatan dekomposisi (30,34). Carter & Metcalf (34) menggarisbawahi pentingnya integrasi data mikrobiota dengan variabel lingkungan menggunakan model statistik atau machine learning untuk meningkatkan prediksi PMI. Sementara itu, Weatherbee dkk. (33) menunjukkan bahwa panel uji mikrobiologi sederhana yang dipadukan dengan algoritma prediksi dapat memberikan akurasi mendekati metode molekuler.

Pendekatan bertahap ini—dimulai dari metode sederhana seperti pewarnaan Gram dan uji biokimia untuk pemetaan awal, lalu validasi molekuler pada penanda terpilih—merupakan strategi yang sesuai dengan kondisi laboratorium forensik di Indonesia yang sering memiliki keterbatasan sumber daya.

Studi Komparatif Dataran Rendah-Tinggi

Variasi iklim antara dataran rendah dan dataran tinggi dapat berpengaruh signifikan terhadap dinamika mikrobiota postmortem. Suhu yang lebih rendah dan kelembapan yang fluktuatif di dataran tinggi memperlambat metabolisme mikroba dan dapat memperpanjang fase-fase awal dekomposisi (22–24). Penelitian Singh dkk. (24) pada model hewan menunjukkan bahwa di lingkungan bersuhu rendah terjadi keterlambatan pertumbuhan bakteri anaerob pembusuk seperti *Clostridium*, sedangkan flora aerob fakultatif bertahan lebih lama. Studi semacam ini masih jarang dilakukan di Indonesia. Padahal, dengan geografis yang beragam, variasi antara daerah pesisir dan pegunungan berpotensi

menciptakan lintasan suksesi mikroba yang berbeda, sehingga memengaruhi akurasi model PMI berbasis mikrobiota.

Integrasi Data dan Model Prediksi

Pengembangan model PMI berbasis mikrobiota idealnya menggabungkan data mikroba dengan variabel lingkungan. Carter & Metcalf (34) menggarisbawahi pentingnya penggunaan algoritma statistik lanjutan atau machine learning untuk memprediksi PMI dari data komunitas mikroba dan parameter lingkungan sekaligus. Dengan demikian, model dapat diadaptasi pada berbagai kondisi iklim. Weatherbee dkk. (33) menunjukkan bahwa bahkan panel uji mikrobiologi sederhana bila dipadukan dengan algoritma prediksi dapat menghasilkan akurasi mendekati metode molekuler. Pendekatan ini sangat relevan untuk Indonesia karena memungkinkan transisi bertahap dari laboratorium sumber daya terbatas ke laboratorium yang lebih maju.

Kesenjangan Riset di Indonesia dan Arah Pengembangan

Saat ini, data mikrobiota postmortem di Indonesia masih sangat terbatas. Sebagian besar kajian PMI masih menggunakan parameter klasik atau serangga (entomologi forensik). Belum ada database nasional suksesi mikroba pada hewan coba atau manusia yang dilakukan secara sistematis di berbagai iklim tropis. Kesenjangan ini menegaskan pentingnya penelitian tahap awal menggunakan model hewan seperti Sprague Dawley untuk membangun kurva suksesi mikroba 0–72 jam pada tiga lokus utama (mulut, mukosa lambung, rektum). Penelitian tahap berikutnya dapat memperluas cakupan ke daerah dataran tinggi atau daerah dengan iklim spesifik untuk melihat konsistensi dan variabilitas pola mikroba (31–35). Dengan basis data tersebut, Indonesia berpotensi menjadi pusat referensi model PMI berbasis mikrobiota di wilayah tropis.

Perkembangan Penelitian Masa Depan

Perkembangan penelitian mikrobiota postmortem di masa depan diarahkan pada integrasi data multi-lokasi, multi-waktu, dan multi-faktor. Dengan memanfaatkan bioinformatika dan machine learning, peneliti dapat membangun model prediksi PMI yang mempertimbangkan faktor lingkungan, lokasi tubuh, dan karakteristik individu secara simultan (30,34). Pendekatan ini memungkinkan penyusunan “jam mikroba” (microbial clock) yang lebih akurat dan adaptif untuk berbagai kondisi (34). Di sisi lain, kemajuan teknologi seperti shotgun metagenomics dan analisis metabolomik memberi peluang untuk mengidentifikasi bukan hanya mikroba dominan, tetapi juga metabolit yang dihasilkan selama dekomposisi yang mungkin lebih spesifik sebagai penanda PMI (34,35).

Penelitian di Indonesia dapat diarahkan pada: (i) pembuatan basis data mikrobiota postmortem hewan coba dari berbagai iklim; (ii) pengembangan algoritma prediksi PMI berbasis mikrobiota lokal; dan (iii) validasi terbatas pada kasus forensik nyata untuk menguji keandalan model tersebut. Langkah bertahap ini realistis mengingat keterbatasan etik dan adat pada penelitian jenazah manusia.

Implikasi bagi Kedokteran Forensik

Penerapan pendekatan mikrobiota postmortem diharapkan meningkatkan objektivitas estimasi PMI dibandingkan metode klasik. Bagi kedokteran forensik di Indonesia, hasil penelitian semacam ini dapat memperkaya **alat bukti ilmiah** di pengadilan, membantu polisi mempersempit waktu kejadian, dan memberikan

dasar ilmiah baru dalam pendidikan kedokteran forensik (1,4,6). Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi dasar pengembangan modul pembelajaran bagi mahasiswa kedokteran mengenai penggunaan indikator biologis baru dalam investigasi kematian.

KESIMPULAN

Literatur review ini menegaskan bahwa analisis mikrobiota postmortem atau thanatomiobiome merupakan pendekatan ilmiah yang menjanjikan untuk memperkirakan Postmortem Interval (PMI) dengan akurasi lebih tinggi dibanding metode klasik. Berdasarkan berbagai studi yang dikaji, suksesi mikroba pada rongga mulut, mukosa lambung, dan rektum berlangsung teratur dan dapat dipetakan secara temporal. Faktor lingkungan—khususnya suhu, kelembapan, iklim mikro, serta perbedaan dataran rendah dan tinggi—mempunyai pengaruh besar terhadap dinamika mikroba sehingga model PMI berbasis mikrobiota harus dikalibrasi sesuai konteks lokal tropis.

Metode identifikasi mikroba melalui kombinasi pewarnaan Gram dan uji biokimia sederhana dapat menjadi langkah awal yang murah, cepat, dan realistis di laboratorium forensik Indonesia. Sementara itu, teknik molekuler seperti 16S rRNA sequencing dan shotgun metagenomics dibutuhkan untuk validasi penanda yang paling stabil. Model hewan Sprague Dawley menyediakan sarana penelitian terkontrol untuk membangun kurva suksesi mikroba dan menguji pengaruh faktor lingkungan sebelum validasi pada jenazah manusia, yang di Indonesia terkendala aspek etik dan adat.

Dengan membangun database mikrobiota postmortem pada berbagai iklim mikro tropis serta mengintegrasikannya dengan algoritma prediksi berbasis machine learning, Indonesia berpeluang menjadi pelopor pengembangan model PMI berbasis mikrobiota tropis. Pendekatan ini tidak hanya memperkuat dasar ilmiah kedokteran forensik nasional, tetapi juga membuka peluang kontribusi pada riset forensik global serta pengembangan bahan ajar kedokteran forensik berbasis mikrobiologi modern.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Madea B. Methods for determining time of death. *Forensic Sci Med Pathol*. 2016;12(4):451–85.
- [2] Henssge C, Madea B. Estimation of the time since death. *Forensic Sci Int*. 2007;165(2–3):182–4.
- [3] Amendt J, et al. Forensic entomology and PMI. *Forensic Sci Int*. 2011;207(1–3):1–9.
- [4] Metcalf JL, et al. Microbial community assembly during mammalian corpse decomposition. *Science*. 2016;351(6269):158–62.
- [5] Carter DO, et al. Cadaver decomposition in terrestrial ecosystems. *Naturwissenschaften*. 2007;94(1):12–24.
- [6] Pechal JL, et al. Microbial functional change during carrion decomposition. *PLoS One*. 2013;8(11):e79035.
- [7] Hyde ER, et al. Bacterial community of a cadaver at onset and end of bloat. *PLoS One*. 2013;8(10):e77733.
- [8] Javan GT, et al. Thanatomiobiome signatures in blood and organs. *J Microbiol Methods*. 2014;106:1–7.

- [9] Javan GT, et al. Human thanatobiome succession. *Sci Rep.* 2016;6:29598.
- [10] Can I, et al. Postmortem microbiota translocation. *Forensic Sci Int.* 2015;254:13–20.
- [11] Burchard RP. Microbial life in humid environments. *Microbiol Rev.* 1981;45(3):429–64.
- [12] Petti CA. Gene amplification and sequencing for microorganism detection. *Clin Infect Dis.* 2007;44(8):1108–14.
- [13] Hall-Stoodley L, et al. Bacterial biofilms: environment to disease. *Nat Rev Microbiol.* 2004;2(2):95–108.
- [14] Beveridge TJ. Use of the Gram stain. *Int J Syst Evol Microbiol.* 2001;51(Pt3):897–900.
- [15] Guo J, et al. Bacterial succession for estimating PMI. *Sci Rep.* 2016;6:24197.
- [16] Lutz H, et al. Forensic microbiome analysis. *Forensic Sci Int Genet.* 2020;46:102259.
- [17] Choudhury D, et al. Sprague Dawley vs Wistar: comparative review. *Int J Pharm Bio Sci.* 2014;5(4):16–22.
- [18] Modinger Y, et al. Rat gut microbiota stability across sites. *Vet Sci.* 2022;9(1):17.
- [19] Tibbett M, et al. Microbial decomposition of animal remains. *Soil Biol Biochem.* 2011;43(9):2049–59.
- [20] Vass AA. Beyond entomology: Forensic microbiology. *Forensic Sci Int.* 2012;222(1–3):293–9.
- [21] Clarke M, et al. Microbial succession in tropical vs temperate climates. *Forensic Sci Int.* 2017;280:42–9.
- [22] Pechal JL, et al. Microclimate effects on PMI estimation. *J Forensic Sci.* 2014;59(2):375–83.
- [23] Hauther KA, et al. Estimating time since death from microbial community data. *PLoS One.* 2015;10(9):e0136462.
- [24] Singh B, et al. Ecology of decomposition in varying climates. *Appl Environ Microbiol.* 2018;84(4):e02500–17.
- [25] Kassahun W, et al. Postmortem gastric microbiota changes. *J Med Microbiol.* 2019;68(11):1621–8.
- [26] Benbow ME, et al. Microbiome of postmortem colon. *Forensic Sci Int.* 2015;254:146–52.
- [27] Forbes BA, et al. *Bailey & Scott's Diagnostic Microbiology.* 12th ed. St. Louis: Mosby Elsevier; 2007.
- [28] Koneman EW, et al. *Color Atlas and Textbook of Diagnostic Microbiology.* 6th ed. Lippincott; 2006.
- [29] MacFaddin JF. *Biochemical Tests for Identification of Medical Bacteria.* 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2000.
- [30] Metcalf JL, et al. Microbiome-based PMI models. *J Forensic Sci.* 2018;63(4):1200–10.
- [31] Crippen TL, et al. Development of microbial indicators for PMI. *Forensic Microbiol.* 2016;34(2):59–68.
- [32] Javan GT, et al. Thanatobiome in organs. *Front Microbiol.* 2018;9:2420.



- [33] Weatherbee CR, et al. Simplified bacterial panels for PMI estimation. *J Forensic Sci.* 2021;66(1):231–8.
- [34] Carter DO, Metcalf JL. Microbiomes in death investigation. *Nat Rev Microbiol.* 2021;19(5):317–29.
- [35] Kusumawati A, et al. Profil mikrobiota usus tikus di tropis. *J Bioeksperimen.* 2021;8(2):47–54.