

Analisis Forensik terhadap Tahapan Pembusukan sebagai Indikator *Post-Mortem Interval*: Tinjauan Pustaka

Zahra Dewi Hasna Difa¹, Anggela¹, Septia Eva Lusina²

¹ Fakultas Kedokteran, Universitas Lampung

² Bagian Ilmu Kedokteran Forensik dan Medikolegal, Fakultas Kedokteran, Universitas Lampung

Abstrak

Pembusukan merupakan proses biologis kompleks yang terjadi setelah kematian akibat interaksi autolisis, aktivitas mikroorganisme, serta pengaruh lingkungan eksternal. Dalam bidang kedokteran forensik, analisis tahapan pembusukan memiliki peran penting dalam estimasi post-mortem interval (PMI). Luka terbuka dan trauma dapat mempercepat proses dekomposisi karena meningkatnya paparan mikroorganisme dan aktivitas serangga. Tinjauan pustaka ini bertujuan membahas mekanisme fisiologis dan morfologis pembusukan, faktor-faktor yang memengaruhi laju dekomposisi, serta kontribusi pendekatan modern seperti entomologi forensik, tanatomikrobioma, histopatologi, dan biomarker molekuler dalam estimasi PMI. Penelitian ini menggunakan metode literature review dengan penelusuran artikel melalui basis data PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar menggunakan kata kunci "forensic", "decomposition", "medicolegal", dan "post-mortem interval". Literatur yang digunakan merupakan artikel nasional maupun internasional yang dipublikasikan pada tahun 2020–2025 serta buku referensi utama forensik. Hasil kajian menunjukkan bahwa estimasi PMI dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal, seperti suhu lingkungan, kelembapan, lokasi jenazah, aktivitas serangga, serta kondisi jaringan tubuh. Pendekatan multidisipliner yang menggabungkan observasi makroskopis, analisis histopatologi, mikrobiologi, dan entomologi forensik dapat meningkatkan akurasi estimasi waktu kematian. Dengan demikian, pemahaman mengenai tahapan pembusukan memiliki peran penting dalam mendukung investigasi medis dan kriminal.

Kata Kunci: Dekomposisi, forensik, medikolegal, post-mortem interval, tanatologi

Forensic Analysis of Decomposition Stages as an Indicator of Post-Mortem Interval: A Literature Review

Abstract

Decomposition is a complex biological process that occurs after death as a result of the interaction between autolysis, microbial activity, and environmental influences. In forensic medicine, the analysis of decomposition stages plays an important role in estimating the post-mortem interval (PMI), particularly in cases of unnatural death and advanced body decomposition. Open wounds and traumatic injuries are known to accelerate decomposition due to increased microbial exposure and insect activity within body tissues. This literature review aims to discuss the physiological and morphological mechanisms of decomposition, factors affecting the rate of body degradation, and recent advances in modern approaches for PMI estimation. The study was conducted using a literature review method through article searches in PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar databases using the keywords "forensic", "decomposition", "medicolegal", "thanatology", and "post-mortem interval". The included literature consisted of national and international articles published between 2020 and 2025, along with several major forensic medicine textbooks. The review demonstrated that decomposition begins with the failure of cellular homeostasis, leading to tissue autolysis followed by putrefaction caused by microbial activity. The rate of decomposition is influenced by several factors, including environmental temperature, humidity, body location, insect activity, body mass, and the presence of open wounds. Multidisciplinary approaches integrating morphological observation, histopathology, forensic entomology, thanatomicrobiome analysis, and molecular biomarkers have been shown to improve the accuracy of PMI estimation compared to the use of a single method. Therefore, understanding the stages of decomposition and the factors influencing them is essential in supporting medical and criminal investigations as well as improving the accuracy of post-mortem interval interpretation.

Keywords: Decomposition, forensic, medicolegal, post-mortem interval, thanatology

Korespondensi: Zahra Dewi Hasna Difa, email : zahradwhd@gmail.com

Pendahuluan

Kematian merupakan suatu proses biologis yang tidak dapat dihindari dan akan dialami oleh setiap makhluk hidup. Dalam ilmu

kedokteran forensik, kematian dipelajari melalui cabang ilmu tanatologi, yaitu ilmu yang membahas mekanisme kematian, perubahan pascakematian, serta estimasi waktu kematian

atau post-mortem interval (PMI). Penentuan PMI memiliki peran yang sangat penting dalam investigasi forensik karena dapat membantu penyidik menentukan waktu terjadinya kematian, merekonstruksi kronologi kejadian, mempersempit rentang waktu tindak kriminal, serta menghubungkan korban dengan tersangka maupun lokasi kejadian perkara.^{1,2}

Estimasi PMI merupakan salah satu tantangan utama dalam praktik kedokteran forensik karena perubahan pascakematian dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal. Faktor internal meliputi usia, jenis kelamin, status gizi, penyebab kematian, kondisi penyakit sebelum kematian, massa tubuh, serta adanya trauma atau luka terbuka. Sementara itu, faktor eksternal meliputi suhu lingkungan, kelembapan, paparan udara, lokasi jenazah, keberadaan air, aktivitas mikroorganisme, dan infestasi serangga. Variasi faktor-faktor tersebut menyebabkan laju perubahan pascakematian dapat berbeda pada setiap individu dan kondisi lingkungan.^{3,4}

Secara umum, perubahan pascakematian dibagi menjadi perubahan awal dan perubahan lanjut. Perubahan awal meliputi algor mortis, rigor mortis, dan livor mortis, sedangkan perubahan lanjut mencakup autolisis dan pembusukan. Algor mortis merupakan penurunan suhu tubuh secara bertahap hingga mencapai suhu lingkungan. Rigor mortis terjadi akibat habisnya cadangan adenosine triphosphate (ATP) pada otot sehingga ikatan aktin dan miosin tidak dapat terlepas. Livor mortis terjadi akibat pengendapan darah pada bagian tubuh terbawah karena pengaruh gravitasi. Ketiga parameter tersebut umumnya digunakan pada fase awal kematian, namun memiliki keterbatasan akurasi pada jenazah dengan dekomposisi lanjut.^{5,6}

Pembusukan merupakan proses degradasi jaringan tubuh setelah kematian yang terjadi akibat interaksi antara autolisis dan putrefaksi. Autolisis dimulai ketika suplai oksigen dan sirkulasi darah berhenti sehingga metabolisme aerobik tidak dapat berlangsung. Penurunan produksi ATP menyebabkan gangguan pompa ion membran, peningkatan permeabilitas sel, akumulasi ion kalsium intraseluler, pembengkakan organel, serta

pelepasan enzim lisosomal yang menghancurkan jaringan tubuh. Setelah proses autolisis berlangsung, mikroorganisme terutama bakteri anaerob dari saluran cerna akan berkembang dan memicu proses putrefaksi. Aktivitas bakteri menghasilkan gas seperti hidrogen sulfida, amonia, dan metana yang menyebabkan perubahan warna kehijauan, pembengkakan tubuh, serta bau khas pembusukan.^{3,7}

Pembusukan memiliki hubungan erat dengan estimasi PMI karena perubahan morfologis yang terjadi berlangsung secara progresif dan relatif teratur. Pada tahap awal pembusukan, warna kehijauan biasanya muncul di daerah fossa iliaka kanan akibat tingginya populasi bakteri pada sekum. Selanjutnya akan terjadi pembentukan marbling, bloating, skin slippage, hingga skeletonisasi pada tahap lanjut. Akan tetapi, laju pembusukan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan karakteristik jenazah sehingga interpretasi PMI berdasarkan pembusukan tidak dapat dilakukan menggunakan satu parameter tunggal.^{8,9}

Dalam perkembangan ilmu forensik modern, pendekatan estimasi PMI tidak lagi hanya bergantung pada pengamatan makroskopis. Berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa entomologi forensik, tanatomikrobioma, histopatologi, metabolomik, serta biomarker molekuler dapat meningkatkan akurasi estimasi waktu kematian. Entomologi forensik memanfaatkan pola perkembangan larva serangga, terutama famili Calliphoridae dan Sarcophagidae, sebagai indikator waktu kematian. Sementara itu, tanatomikrobioma mempelajari perubahan komunitas mikroorganisme setelah kematian yang diketahui memiliki pola progresif tertentu.^{10,11}

Pendekatan multidisipliner dalam estimasi PMI menjadi semakin penting, terutama pada kasus jenazah dengan dekomposisi lanjut, jenazah terbakar, jenazah terendam air, atau kasus kematian dengan interval waktu yang panjang. Integrasi antara pemeriksaan morfologis, mikrobiologi, entomologi, histopatologi, dan biomarker molekuler diharapkan mampu meningkatkan

objektivitas dan akurasi interpretasi waktu kematian dalam investigasi forensik.¹²

Berdasarkan uraian tersebut, tinjauan pustaka ini bertujuan untuk membahas mekanisme fisiologis pembusukan, tahapan perubahan pascakematian, faktor-faktor yang memengaruhi laju dekomposisi, serta perkembangan pendekatan modern dalam estimasi *post-mortem interval* pada praktik kedokteran forensik.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *literature review* atau tinjauan pustaka untuk mengkaji hubungan antara tahapan pembusukan dengan estimasi *post-mortem interval* (PMI) dalam bidang kedokteran forensik. Metode *literature review* digunakan untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai mekanisme fisiologis pembusukan, faktor-faktor yang memengaruhi proses dekomposisi, serta perkembangan pendekatan modern dalam estimasi waktu kematian berdasarkan berbagai penelitian yang telah dipublikasikan.^{1,2}

Penelusuran literatur dilakukan secara sistematis melalui beberapa basis data elektronik, yaitu PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar. Proses pencarian menggunakan kombinasi kata kunci dalam bahasa Inggris dan bahasa Indonesia, antara lain “forensic”, “decomposition”, “post-mortem interval”, “thanatology”, “medicolegal”, “forensic entomology”, “thanatobiome”, “pembusukan”, dan “post-mortem interval”. Strategi pencarian dilakukan menggunakan operator Boolean seperti *AND* dan *OR* untuk memperoleh artikel yang relevan dengan topik penelitian.^{7,8}

Kriteria inklusi dalam penelitian ini meliputi artikel nasional dan internasional yang membahas pembusukan, perubahan pascakematian, maupun estimasi *post-mortem interval*; artikel penelitian asli, *literature review*, dan laporan kasus yang relevan dengan topik; artikel yang dipublikasikan pada tahun 2020–2025; serta artikel yang tersedia dalam bentuk *full text*. Selain itu, beberapa buku referensi utama kedokteran forensik dan patologi forensik juga digunakan sebagai sumber pendukung.^{1–3}

Kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak sesuai dengan fokus penelitian, artikel yang tidak tersedia dalam bentuk *full text*, artikel dengan data yang tidak jelas atau tidak memiliki validitas ilmiah yang memadai, serta publikasi sebelum tahun 2020, kecuali buku referensi utama yang masih relevan dan digunakan secara luas dalam bidang kedokteran forensik.^{2,3}

Tahapan seleksi literatur dilakukan melalui proses identifikasi, skrining, dan evaluasi kelayakan artikel berdasarkan kesesuaian judul, abstrak, serta isi artikel dengan tujuan penelitian. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi kemudian dianalisis dan disintesis secara naratif.^{5,6}

Data yang diperoleh dari berbagai sumber literatur diklasifikasikan berdasarkan tema pembahasan, meliputi mekanisme autolisis, putrefaksi, faktor-faktor yang memengaruhi pembusukan, tahapan dekomposisi, entomologi forensik, tanatomikrobioma, serta pendekatan molekuler dalam estimasi *post-mortem interval*. Selanjutnya, data dianalisis secara deskriptif untuk menjelaskan hubungan antara tahapan pembusukan dan estimasi waktu kematian dalam praktik kedokteran forensik.^{7,8}

Pembahasan

Tanatologi

Tanatologi merupakan cabang ilmu kedokteran forensik yang mempelajari kematian serta perubahan yang terjadi setelah kematian. Istilah tanatologi berasal dari bahasa Yunani, yaitu *thanatos* yang berarti kematian dan *logos* yang berarti ilmu. Secara klinis, kematian terjadi akibat berhentinya fungsi sistem saraf pusat, sistem kardiovaskular, dan sistem respirasi secara permanen. Setelah kematian terjadi, metabolisme aerobik sel akan berhenti akibat tidak adanya suplai oksigen, namun metabolisme anaerob masih dapat berlangsung sementara waktu sehingga menyebabkan akumulasi asam laktat dan penurunan pH jaringan.^{1,4,5}

Dalam praktik kedokteran forensik, tanda kematian dibedakan menjadi tanda tidak pasti dan tanda pasti kematian. Tanda tidak pasti kematian meliputi henti napas, henti sirkulasi, relaksasi otot, pucat kulit,

pengeringan kornea, serta segmentasi pembuluh darah retina. Penilaian tanda-tanda tersebut dilakukan melalui inspeksi, palpasi, dan auskultasi. Sementara itu, tanda pasti kematian terdiri atas *livor mortis*, *rigor mortis*, *algor mortis*, dan pembusukan (*decomposition*).^{4,5}

Livor mortis atau lebam mayat terjadi akibat pengendapan eritrosit pada bagian tubuh terbawah karena pengaruh gravitasi. Kondisi ini mulai tampak sekitar 20–30 menit setelah kematian dan menjadi lengkap dalam waktu 8–12 jam. *Rigor mortis* atau kaku mayat terjadi akibat berhentinya metabolisme seluler dan habisnya cadangan adenosine triphosphate (ATP) pada otot, sehingga filamen aktin dan miosin tidak dapat terlepas. Kaku mayat umumnya mulai muncul sekitar 2–4 jam setelah kematian dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti aktivitas fisik sebelum kematian, suhu tubuh, massa otot, serta suhu lingkungan.^{3,4}

Selain itu, *algor mortis* merupakan penurunan suhu tubuh secara bertahap hingga mencapai suhu lingkungan. Penurunan suhu tubuh dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, pakaian, ventilasi udara, kelembapan, dan massa tubuh. Oleh karena itu, estimasi waktu kematian berdasarkan *algor mortis* memiliki keterbatasan apabila digunakan sebagai satu-satunya parameter, terutama pada jenazah dengan dekomposisi lanjut.^{2,3}

Pembusukan merupakan perubahan lanjut pascakematian yang terjadi akibat interaksi antara autolisis dan putrefaksi. Autolisis merupakan proses penghancuran jaringan oleh enzim tubuh sendiri akibat kegagalan homeostasis seluler setelah kematian. Penurunan produksi ATP menyebabkan gangguan pompa ion membran, peningkatan permeabilitas sel, akumulasi ion kalsium intraseluler, serta pelepasan enzim lisosomal yang memicu degradasi jaringan. Setelah proses autolisis berlangsung, bakteri terutama dari saluran cerna akan berkembang dan memicu putrefaksi.^{4,5,10}

Pada tahap awal pembusukan, perubahan warna kehijauan biasanya muncul di daerah *fossa iliaca* kanan akibat tingginya populasi bakteri pada sekum. Warna kehijauan tersebut disebabkan oleh pembentukan

sulfhemoglobin akibat interaksi hidrogen sulfida dengan hemoglobin darah. Selanjutnya, perubahan warna akan menyebar ke seluruh tubuh disertai pembentukan pola pembuluh darah superfisial berwarna hijau kehitaman (*marbling*) dan timbulnya bau khas pembusukan.^{4,5,10}

Post Mortem Interval

Post-mortem interval (PMI) merupakan rentang waktu antara terjadinya kematian hingga pemeriksaan jenazah dilakukan. Penentuan PMI memiliki peran penting dalam investigasi forensik karena berkaitan dengan rekonstruksi waktu kejadian, identifikasi korban, dan interpretasi penyebab kematian. Estimasi PMI dilakukan melalui evaluasi perubahan fisik, biokimia, histologis, mikrobiologis, dan entomologis yang terjadi setelah kematian.^{1,6}

Pada fase awal kematian, estimasi PMI dapat dilakukan melalui pengamatan *algor mortis*, *rigor mortis*, dan *livor mortis*. Namun, pada fase dekomposisi lanjut, ketiga parameter tersebut menjadi kurang akurat sehingga diperlukan pendekatan lain, seperti analisis pembusukan dan entomologi forensik. Faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, paparan udara, lokasi jenazah, dan aktivitas serangga diketahui dapat memengaruhi laju perubahan pascakematian sehingga menyebabkan variasi estimasi waktu kematian.^{5,6}



Gambar 1. Fresh stage¹⁴

Dalam entomologi forensik, lalat merupakan serangga pertama yang umumnya datang pada tubuh yang mengalami dekomposisi. Larva lalat dapat digunakan sebagai indikator PMI karena memiliki pola

pertumbuhan yang relatif teratur sesuai suhu lingkungan. Famili lalat yang paling sering digunakan dalam estimasi PMI adalah *Calliphoridae* (*blow flies*) dan *Sarcophagidae* (*flesh flies*).^{7,9}

Perkembangan ilmu forensik modern menunjukkan bahwa estimasi PMI tidak lagi hanya bergantung pada pengamatan makroskopis. Pendekatan molekuler seperti tanatomikrobioma mulai digunakan untuk menganalisis perubahan komunitas mikroorganisme setelah kematian. Zapico dan Garriga melaporkan bahwa proses autolisis dapat dimulai beberapa menit setelah kematian dan menyebabkan perubahan kadar DNA, protein, serta metabolit jaringan yang berpotensi digunakan sebagai biomarker PMI.⁸ Selain itu, pemeriksaan histopatologi dan biomarker molekuler dinilai mampu meningkatkan objektivitas estimasi waktu kematian dibandingkan penggunaan satu metode tunggal.^{7,8}

Pembusukan

Pembusukan merupakan proses degradasi jaringan tubuh yang terjadi akibat interaksi autolisis dan putrefaksi setelah kematian. Secara fisiologis, proses ini diawali oleh berhentinya suplai oksigen dan nutrisi ke dalam sel sehingga metabolisme aerobik tidak dapat berlangsung. Penurunan produksi ATP menyebabkan gangguan pompa ion membran, akumulasi ion kalsium intraseluler, pembengkakan organel, serta kerusakan membran lisosom yang memicu pelepasan enzim hidrolitik. Enzim tersebut kemudian menghancurkan komponen sel dan menyebabkan autolisis jaringan.^{1,5,14}



Gambar 2. Bloated Stage¹⁴

Setelah autolisis berlangsung, mikroorganisme terutama bakteri anaerob dari saluran cerna akan berkembang dan menyebar ke seluruh tubuh. Aktivitas bakteri menghasilkan gas seperti hidrogen sulfida, amonia, dan metana yang menyebabkan pembengkakan tubuh (*bloating*), perubahan warna kehijauan, serta bau khas pembusukan. Proses putrefaksi juga menyebabkan terbentuknya pola bercabang pada pembuluh darah superfisial yang dikenal sebagai *marbling*.^{5,14}

Tahapan pembusukan secara umum terdiri atas *fresh stage*, *bloated stage*, *active decay*, *advanced decay*, dan *dry remains*. Pada *fresh stage*, perubahan eksternal belum tampak jelas meskipun autolisis telah dimulai secara mikroskopis. Selanjutnya, *bloated stage* ditandai dengan akumulasi gas akibat aktivitas bakteri sehingga abdomen membesar dan jaringan mulai mengalami perubahan warna. Pada tahap *active decay*, jaringan lunak mengalami degradasi cepat disertai aktivitas larva yang tinggi dan bau pembusukan yang kuat. Tahap *advanced decay* ditandai dengan berkurangnya jaringan lunak secara signifikan, sedangkan tahap *dry remains* ditandai dengan skeletonisasi dan tersisanya jaringan kering.^{5,11,14}

Putrefaksi menyebabkan jaringan tubuh menjadi lembap, lunak, dan dipenuhi gas. Pada tahap ini, bakteri menyebar melalui pembuluh darah dan menyebabkan hemolisis darah sehingga terbentuk *marbling*, yaitu pola bercabang berwarna merah kehijauan pada kulit. Kondisi ini umumnya tampak jelas sekitar satu minggu pascakematian pada suhu lingkungan 18–20°C.^{5,14}

Selain perubahan warna, proses pembusukan juga menyebabkan terbentuknya lepuhan kulit dan fenomena *skin slippage*, yaitu terlepasnya epidermis akibat degradasi jaringan ikat antara epidermis dan dermis. Infestasi larva mempercepat kerusakan jaringan melalui aktivitas proteolitik dan penghancuran mekanik jaringan lunak. Kondisi tersebut menyebabkan sidik jari menjadi sulit digunakan untuk identifikasi karena lapisan epidermis jari terlepas.^{9,10}

Kecepatan pembusukan organ internal berbeda-beda tergantung karakteristik

fisiologis jaringan. Organ dengan kandungan enzim proteolitik tinggi seperti pankreas dan mukosa gastrointestinal mengalami autolisis lebih cepat dibandingkan organ lain. Sebaliknya, uterus dan prostat lebih resisten terhadap pembusukan karena memiliki struktur fibromuskular yang padat. Otak mengalami perubahan warna menjadi abu-abu dan mengalami likuifikasi progresif dalam beberapa minggu setelah kematian.^{1,5}



Gambar 3. Decay Stage¹⁴

Faktor lingkungan memiliki pengaruh besar terhadap laju pembusukan. Suhu tinggi dan kelembapan tinggi dapat meningkatkan aktivitas enzimatik dan proliferasi bakteri sehingga mempercepat dekomposisi. Luka bakar, luka tusuk, luka robek, maupun perdarahan luas juga dapat mempercepat pembusukan akibat meningkatnya kolonisasi bakteri dan infestasi serangga. Sebaliknya, suhu rendah dan minimnya aktivitas serangga dapat memperlambat proses dekomposisi.^{5,11}

Pada jenazah yang terendam air, pembusukan umumnya berlangsung lebih lambat dibandingkan di udara. Konsep tersebut dikenal melalui *Casper's dictum* yang menyatakan bahwa perbandingan laju pembusukan tubuh di udara, air, dan tanah adalah 1:2:8.11 Namun demikian, beberapa penelitian modern menunjukkan bahwa rasio tersebut tidak selalu konsisten karena dipengaruhi oleh suhu, arus air, kedalaman, dan kondisi lingkungan lainnya.¹¹

Selain pembusukan biasa, perubahan pascakematian juga dapat berupa pembentukan adiposera dan mumifikasi. Adiposera merupakan perubahan jaringan lemak menjadi substansi menyerupai lilin

akibat proses hidrolisis dan hidrogenasi lemak tubuh. Kondisi ini umumnya ditemukan pada jenazah yang berada di lingkungan lembap, terendam air, atau dikubur dalam tanah basah. Adiposera dapat memperlambat pembusukan karena meningkatkan keasaman jaringan dan menghambat pertumbuhan mikroorganisme.^{4,10,11}

Mumifikasi merupakan proses pengeringan jaringan tubuh akibat kehilangan cairan secara progresif. Kondisi ini biasanya terjadi pada lingkungan panas, kering, dan memiliki ventilasi baik. Jaringan tubuh menjadi keras, kering, dan berwarna kecoklatan. Mumifikasi dapat mempertahankan struktur tubuh dalam waktu lama sehingga membantu identifikasi forensik pada beberapa kasus.^{9,10}

Ringkasan

Pembusukan merupakan proses biologis kompleks yang terjadi setelah kematian akibat interaksi antara autolisis, putrefaksi, aktivitas mikroorganisme, dan faktor lingkungan. Dalam ilmu kedokteran forensik, pembusukan memiliki peran penting dalam estimasi *post-mortem interval* (PMI), yaitu rentang waktu sejak kematian hingga pemeriksaan jenazah dilakukan. Estimasi PMI sangat penting dalam investigasi forensik karena membantu rekonstruksi waktu kejadian, identifikasi korban, dan interpretasi penyebab kematian.

Perubahan pascakematian terdiri atas perubahan awal dan perubahan lanjut. Perubahan awal meliputi *algor mortis*, *rigor mortis*, dan *livor mortis*, sedangkan perubahan lanjut mencakup autolisis dan pembusukan. Autolisis dimulai akibat berhentinya suplai oksigen dan metabolisme aerobik sehingga terjadi penurunan produksi ATP, gangguan pompa ion membran, peningkatan permeabilitas sel, dan pelepasan enzim lisosomal yang menyebabkan degradasi jaringan. Selanjutnya, proses putrefaksi berlangsung akibat aktivitas mikroorganisme, terutama bakteri anaerob dari saluran cerna, yang menghasilkan gas dan menyebabkan perubahan warna, pembengkakan tubuh, serta bau khas pembusukan.

Tahapan pembusukan berlangsung secara progresif mulai dari *fresh stage*, *bloated stage*, *active decay*, *advanced decay*, hingga

dry remains. Selama proses tersebut dapat ditemukan berbagai perubahan khas forensik seperti *marbling*, *skin slippage*, infestasi larva, pembentukan adiposera, dan mumifikasi. Kecepatan pembusukan dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti suhu lingkungan, kelembapan, aktivitas serangga, lokasi jenazah, kondisi jaringan tubuh, serta adanya luka terbuka atau trauma.

Perkembangan ilmu forensik modern menunjukkan bahwa estimasi PMI tidak lagi hanya mengandalkan pengamatan morfologis, tetapi juga menggunakan pendekatan multidisipliner seperti entomologi forensik, histopatologi, tanatomikrobioma, dan biomarker molekuler. Pendekatan tersebut dinilai mampu meningkatkan objektivitas dan akurasi estimasi waktu kematian, terutama pada jenazah dengan dekomposisi lanjut.

Simpulan

Pembusukan merupakan proses degradasi jaringan tubuh setelah kematian yang melibatkan mekanisme autolisis dan putrefaksi serta dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal. Tahapan pembusukan memiliki hubungan erat dengan estimasi *post-mortem interval* (PMI) dalam praktik kedokteran forensik karena perubahan morfologis dan fisiologis yang terjadi berlangsung secara progresif dan relatif teratur.

Penentuan PMI tidak dapat dilakukan hanya dengan satu parameter karena laju pembusukan dipengaruhi oleh suhu lingkungan, kelembapan, aktivitas mikroorganisme, infestasi serangga, lokasi jenazah, serta karakteristik jaringan tubuh dan adanya luka terbuka. Oleh karena itu, pendekatan multidisipliner yang menggabungkan pemeriksaan morfologis, entomologi forensik, histopatologi, tanatomikrobioma, dan biomarker molekuler diperlukan untuk meningkatkan akurasi estimasi waktu kematian.

Pemahaman yang baik mengenai tahapan pembusukan dan faktor-faktor yang memengaruhinya memiliki peran penting dalam mendukung investigasi medis dan kriminal serta meningkatkan ketepatan interpretasi forensik terhadap waktu kematian

Daftar Pustaka

1. Abdul G. *Buku ajar kedokteran forensik dan medikolegal*. Jakarta: UMSU Press; 2020.
2. Saukko P, Knight B. *Knight's forensic pathology*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press; 2016.
3. Payne-James J, Jones R, Karch SB, Manlove J, Simpson K. *Simpson's forensic medicine*. 13th ed. London: Hodder Arnold; 2011.
4. Wei W, Michu Q, Wenjuan D, Jianrong W, Zhibing H, Ming Y, et al. Histological changes in human skin 32 days after death and the potential forensic significance. *Sci Rep*. 2020;10:1-10.
5. Lopez JLR, Navadijo MP. Estimation of the post-mortem interval: A review. *Forensic Sci Int*. 2025;365:111-120.
6. Putra AB, Amin IF, Fauzan M, Safitry O. Meluruskan kesalahpahaman matematika pada rasio Casper's dictum. *Indones J Legal Forensic Sci*. 2022;12(1):1-6.
7. Scieuzo C, Rinaldi R, De Stefano F, Di Fazio A, Falabella P. The contribution of molecular biology to forensic entomology. *Insects*. 2025;16(694):1-20.
8. Zapico SC, Garriga J. Approaches to post-mortem interval estimation through thanatobiology and thanatomicrobiome analysis. *Forensic Sci Med Pathol*. 2022;18(2):145-154.
9. Siregar RNF, Suwandi JF, Kurniati I. Entomologi forensik. *J Agromedicine*. 2022;9(1):76-80.
10. Magni PA, Lawn J, Guareschi EE. A practical review of adipocere: Key findings, case studies, and operational considerations from crime scene to autopsy. *Forensic Sci Int*. 2020;78:1-12.
11. Deshpande A. Forensic entomology. *J Forensic Dent Sci*. 2025;15:44-48.
12. Agarwal S, Kumar L, Chavali K. Estimation of time since death. In: *Legal medicine manual*. 2020. p.1-15.
13. Baskoro MA, Suwandono A, Wujoso H. Hubungan pembusukan dengan penentuan sebab kematian pada jenazah tanpa identitas yang dilakukan otopsi di RSUD Dr. Moewardi tahun 2011–2021. *Plexus Med J*. 2023;2(3):94-99.

14. Goff ML. Early postmortem changes and stages of decomposition. Hawaii: Chaminade University; 2010