

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Ilmu forensik adalah cabang ilmu kedokteran yang mempelajari penerapan ilmu kedokteran dalam penegakan keadilan yang dilakukan untuk kepentingan investigasi kejahatan, penegakan hukum dan peradilan [2]. Berdasarkan objek pemeriksaannya, ilmu forensik dapat digunakan untuk melakukan pemeriksaan pada manusia hidup, mayat, dan bagian tubuh manusia.

Bagian ilmu forensik yang secara khusus mempelajari kematian dan perubahan yang terjadi setelah kematian disebut Tanatologi [3]. Tanatologi memiliki kegunaan antara lain untuk memastikan kematian klinis, memperkirakan sebab kematian, memperkirakan cara kematian, dan memperkirakan waktu kematian. Dari tiga kegunaan tersebut, memperkirakan waktu kematian adalah yang paling fundamental dalam suatu investigasi kematian. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode untuk memperkirakan waktu kematian.

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengestimasi waktu kematian. Marthur dan Agrawal memberikan beberapa gambaran umum terkait beberapa metode yang digunakan untuk estimasi waktu kematian [4]. Metode yang pertama adalah Forensik Entomologi, yakni ilmu yang mempelajari urutan tahap perkembangan berbagai jenis serangga yang ditemukan pada mayat yang sudah membusuk [5–8]. Seorang ahli entomologi forensik menggunakan pemahamannya mengenai lama waktu kolonisasi serangga untuk mengestimasi waktu kematian. Meskipun demikian, tidak semua spesies serangga yang ditemukan pada tubuh mayat dapat digunakan untuk entomologi forensik. Contohnya, Ivorra yang berfokus pada penggunaan serangga spesies *Synthesiomyia nudiseta* (Diptera: Muscidae) untuk memperkirakan waktu kematian [6].

Selain itu, estimasi waktu kematian dapat dilakukan dengan menganalisis konsentrasi pottasium pada *vitreous humor*. Metode ini didasarkan pada meningkatnya kadar pottasium dalam *vitreous humor* saat kematian terjadi [9–11]. Penelitian yang dilakukan oleh Tumram memeriksa kadar potassium pada *vitreous humor* dan cairan synovial pada 154 kasus medikolegal dengan waktu waktu kematian di-

ketahui dan menghasilkan model berupa regresi linear [9]. Selain itu, Da Cunha memaparkan review sistematis mengenai berbagai prosedur dan model regresi yang telah dikembangkan untuk meningkatkan estimasi waktu kematian yang melibatkan *vitreous humor* [10].

Metode lain yang dapat digunakan untuk mengestimasi lama waktu kematian adalah dengan mengamati perubahan fisis yang terjadi pada mayat. Perubahan-perubahan tersebut antara lain *Rigor Mortis* (kaku mayat), *Livor Mortis* (lebam mayat), dan *Algor Mortis* (pendinginan tubuh) [4, 12]. Dari ketiga perubahan tersebut, estimasi waktu kematian dengan pendinginan tubuh merupakan yang paling populer. Estimasi waktu kematian dengan pendinginan tubuh berangkat dari fakta bahwa suhu tubuh menurun pasca kematian terjadi [13–20]. Untuk mengestimasi waktu kematian dengan pendinginan tubuh, digunakan data suhu tubuh yang diukur dari rektum atau liver. Adapun Kaliszian yang melakukan estimasi waktu kematian pada tiga buah kasus kematian dengan menggunakan suhu yang diukur dari bola mata [21]. Lebih lanjut, Knight memaparkan konsep penggunaan pendinginan tubuh untuk estimasi waktu kematian [14], Nokes menjelaskan delapan teknik berbasis pendinginan tubuh yang umum digunakan untuk estimasi waktu kematian [15] dan Laplace membahas akurasi tiga metode estimasi waktu kematian berbasis pendinginan tubuh [22].

Pada abad ke-19, Rainy [23] adalah orang yang pertama kali memperkenalkan konsep matematis untuk pendinginan tubuh manusia dengan cara mengeksplorasi pengadaptasian hukum pendinginan Newton pada fenomena pendinginan tubuh manusia. Untuk menghitung laju pendinginan per jam, ia menggunakan urutan data pengukuran suhu yang diukur dari rektum. Lebih lanjut, ia juga menyatakan bahwa hukum pendinginan Newton tidak sepenuhnya benar ketika diaplikasikan pada pendinginan tubuh manusia [13].

Namun demikian, Brown dan Marshall menyatakan bahwa hukum pendinginan Newton valid untuk diaplikasikan pada pendinginan tubuh manusia dengan mengasumsikan tubuh manusia sebagai *thermally thin* [24]. Suatu objek disebut *thermally thin* jika objek tersebut memiliki ukuran fisik, kerapatan, dan konduktivitas termal sedemikian rupa sehingga perbedaan temperatur pada saat pendinginan antara suhu titik mana pun yang berada jauh di dalam benda dan suhu permukaannya dapat diabaikan. Asumsi tersebut tidak valid, dikarenakan tubuh manusia tersusun atas organ-organ yang perbedaan temperturnya tidak dapat diabaikan.

Kurva penurunan suhu tubuh dengan hukum pendinginan Newton menghasilkan bentuk seperti kurva peluruhan eksponensial [23, 24]. Akan tetapi, suhu

pasca kematian tidak menurun seperti fungsi peluruhan eksponensial dikarenakan adanya *plateau postmortem*. *Plateau postmortem* adalah fenomena penurunan suhu tubuh pasca kematian yang relatif lebih lambat pada periode awal pasca kematian dan turun lebih cepat pada waktu yang lebih lama. Fenomena tersebut terjadi disebabkan oleh tubuh yang masih memiliki sisa panas yang cukup banyak di organ-organ dalam. Akibat adanya *plateau postmortem* ini mengakibatkan kurva penurunan suhu tubuh pasca kematian berbentuk sigmoid [13, 23].

*Plateau postmortem* pada pendinginan tubuh sulit dianalisis dan tidak ada bentuk matematika yang merepresentasikannya, hingga pada tahun 1962, Marshall dan Hoare mengusulkan model eksponensial ganda untuk memodelkan proses pendinginan tubuh pasca kematian [25]. Model tersebut memiliki kurva berbentuk sigmoid yang didalamnya memuat *plateau postmortem*. Termuatnya *plateau postmortem* ini mengimplikasikan bahwa model yang diusulkan Marshall dan Hoare dapat menggambarkan perilaku penurunan suhu yang relatif lebih lambat pada periode awal pasca kematian dan kemudian menurun lebih curam pada periode selanjutnya. Sekitar dua dekade setelahnya, Henssge mengembangkan model Marshall-Hoare dan mengkaji hubungan berat badan dan laju pendinginan tubuh sedemikian sehingga penelitian yang beliau lakukan menghasilkan suatu metode estimasi waktu kematian baru yang hanya memerlukan satu kali pengukuran suhu tubuh bernama metode Nomogram [18].

Pada tahun 2015, Rodrigo mengkonstruksi model kompartemen untuk masalah pendinginan tubuh setelah kematian [26]. Untuk melakukannya, ia menggunakan rektum sebagai kompartemen tunggal. Model yang dihasilkan berbentuk persamaan diferensial dimana model tersebut mendeskripsikan energi panas yang masuk ke rektum yang disebabkan oleh konduktivitas termal tubuh korban. Selain itu, Rodrigo juga mengusulkan sebuah metode untuk memperkirakan waktu kematian dari data suhu tubuh yang diukur dari rektum dengan menggunakan pendekatan transformasi Laplace dan selisih kuadrat tekecil nonlinear [1, 26]. Lebih lanjut, Wulandari memodifikasi parameter pada model Rodrigo berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan Henssge [18] tentang hubungan berat badan dan laju pendinginan mayat sedemikian sehingga estimasi waktu kematian yang ia lakukan dapat mempertimbangkan berat badan mayat [27]. Berbeda dengan Henssge yang menggunakan data suhu tubuh dan berat badan sebagai dasar dalam mengusulkan metode Nomogram untuk mengestimasi waktu kematian [18], Wulandari [27] mengestimasi waktu kematian menggunakan metode transformasi Laplace yang diusulkan oleh Rodrigo pada model yang beliau kontruksi ulang.

Untuk melakukan estimasi waktu kematian berdasarkan pendinginan tubuh, diperlukan data suhu tubuh yang diukur secara berulang dalam interval waktu tertentu. Dengan hanya menggunakan data suhu tubuh, penelitian-penelitian sebelumnya mengestimasi waktu kematian dengan mengasumsikan suhu lingkungan mayat adalah konstan [1, 18, 21, 26–28]. Sedangkan, pada realitanya suhu lingkungan seiring waktu mengalami perubahan yang disebabkan energi yang masuk (terutama dari matahari) dan energi yang keluar dari permukaan bumi [29]. Perubahan suhu lingkungan ini akan mempengaruhi laju pendinginan dari mayat itu sendiri. Contohnya, seseorang yang mati di daerah suhu rendah akan mengalami pendinginan tubuh lebih cepat daripada seseorang yang mati di daerah dengan suhu yang lebih tinggi.

Berangkat dari permasalahan di atas, dalam penelitian ini sebuah model pendinginan tubuh dibangun dengan mempertimbangkan perubahan suhu lingkungan di sekitar mayat. Model tersebut dibangun dengan memodifikasi faktor suhu lingkungan seperti yang dijelaskan pada [26] dengan mengubahnya menjadi sebuah fungsi sinusoidal dengan tiga buah parameter yang tidak diketahui. Fungsi tersebut dipilih karena suhu lingkungan biasanya menunjukkan pola periodik, seperti suhu yang lebih tinggi di siang hari dan lebih rendah pada malam hari. Parameter-parameter dari fungsi sinusoidal ini diestimasi menggunakan metode selisih kuadrat terkecil nonlinear. Lebih jauh lagi, penelitian ini juga mengestimasi waktu kematian berdasarkan pengukuran suhu tubuh mayat dan suhu lingkungan disekitar mayat pada model yang telah dibangun menggunakan metode selisih kuadrat terkecil nonlinear berdasarkan penelitian Rodrigo [1]. Perbedaan terdapat pada model yang diestimasi, Rodrigo mengestimasi waktu kematian pada model dasar yang tidak memperhatikan perubahan suhu lingkungan [1]. Sedangkan, penelitian ini mengestimasi parameter suhu lingkungan dan waktu kematian pada model baru yang memperhatikan perubahan suhu lingkungan.

Metode selisih kuadrat terkecil adalah teknik yang paling umum digunakan untuk menyesuaikan model dengan data yang diberikan. Selain itu, metode ini dapat diterapkan pada fitting fungsi nonlinear, memungkinkan penyesuaian model yang lebih kompleks [30, 31]. Dalam konteks penelitian ini, metode selisih kuadrat terkecil digunakan dua kali. Pertama, untuk mengestimasi parameter fungsi suhu lingkungan dengan cara meminimalkan selisih kuadrat antara fungsi suhu lingkungan pada data teoritis yang dibangun. Kedua, metode ini juga diterapkan untuk estimasi parameter waktu kematian pada model pendinginan tubuh dengan cara meminimalkan selisih kuadrat antara model pendinginan tubuh pada data teoritis lain yang dibangun. Penting untuk dicatat bahwa kedua fungsi yang dimaksud

merupakan fungsi nonlinear.

Mengestimasi parameter menggunakan metode selisih kuadrat terkecil pada fungsi nonlinear tidak semudah pada fungsi linear. Tantangan baru dihadapi ketika estimasi pada fungsi nonlinear menghasilkan fungsi objektif yang kompleks atau tidak mudah didiferensialkan. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini menggunakan algoritma Nelder-Mead untuk meminimasi fungsi objektif sebagaimana yang dilakukan oleh Rodrigo [1]. Algoritma Nelder-Mead meminimasi dengan iterasi menggunakan suatu bentuk geometris bernama *simplex* dan prosesnya tidak memerlukan informasi turunan dari fungsi objektif [32–34]. Berbeda dengan Rodrigo yang menerapkan algoritma Nelder-Mead pada proses estimasi waktu kematian saja, penelitian ini menerapkan algoritma Nelder-Mead dua kali, yakni pada proses estimasi parameter fungsi suhu lingkungan dan estimasi waktu kematian.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dinamika pendinginan tubuh pasca kematian merupakan bagian dari kajian ilmu forensik yang dapat direpresentasikan sebagai suatu model matematika. Pada umumnya, model matematis pendinginan tubuh dikonstruksi tanpa memperhatikan perubahan suhu lingkungan [1, 21, 24–27, 35]. Namun, pada realitanya energi yang masuk dan keluar dari permukaan bumi dapat menyebabkan perubahan suhu lingkungan [29]. Perubahan suhu lingkungan yang terjadi dapat mempengaruhi dinamika pendinginan tubuh pasca kematian. Contohnya, tubuh seseorang yang mati pada lingkungan bersuhu rendah akan mendingin lebih cepat daripada seseorang yang mati pada lingkungan yang bersuhu lebih tinggi.

Berdasarkan fenomena tersebut, rumusan masalah yang diusulkan oleh peneliti pada skripsi ini adalah bagaimana dinamika pendinginan tubuh pasca kematian dengan memperhatikan terjadinya perubahan suhu lingkungan dan bagaimana cara menganalisa waktu kematian seorang mayat berdasarkan pendinginan tubuh mayat dan perubahan suhu lingkungan yang terjadi disekitarnya.

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk menjaga penelitian ini agar tidak menyimpang dari tujuan yang ingin diperoleh, maka ditentukan beberapa batasan masalah antara lain sebagai berikut.

1. Data yang digunakan adalah data suhu tubuh mayat yang diasumsikan diukur pada rektum mayat dan suhu lingkungan disekitar mayat ditemukan, di mana

keduanya merupakan data teoritis yang dibangun dengan cara memisalkan parameter-parameter yang diperlukan pada persamaan terkait.

2. Perubahan suhu lingkungan diasumsikan mengikuti fungsi sinusoidal dengan tiga parameter. Asumsi ini dibuat berdasarkan pola periodik yang terjadi pada perubahan suhu lingkungan.
3. Parameter yang akan diestimasi adalah parameter-parameter fungsi suhu lingkungan dan parameter waktu kematian.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan, maka tujuan dari skripsi ini adalah sebagai berikut.

1. Mengonstruksi model pendinginan tubuh dengan suhu lingkungan non-konstan yang dilakukan dengan memodifikasi faktor suhu lingkungan dalam hukum pendinginan Newton pada model suhu Marshall Hoare [26] menjadi fungsi sinusoidal yang bergantung pada waktu.
2. Mengestimasi parameter-parameter pada suhu lingkungan dan parameter waktu kematian dalam model pendinginan tubuh yang dimodifikasi menggunakan metode selisih kuadrat terkecil nonlinear, dengan minimasi fungsi objektif menggunakan algoritma Nelder-Mead.

#### **1.5 Metode Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan untuk penelitian skripsi ini adalah sebagai berikut.

1. Studi literatur

Tahap studi literatur merupakan tahapan pencarian informasi yang dibutuhkan untuk tugas akhir yang berkaitan dengan model pendinginan tubuh pasca kematian dan estimasi waktu kematian. Studi literatur ini diperoleh dari artikel, jurnal, buku, dan lain sebagainya.

2. Analisis

Pada tahap analisis, dilakukan konstruksi model pendinginan tubuh dengan suhu lingkungan nonkonstan yang dilakukan dengan cara memodifikasi faktor suhu lingkungan dalam hukum Pendinginan Newton pada model suhu Marshall-Hoare [26] menjadi suatu fungsi sinusoidal bergantung waktu yang



nilai parameter-parameternya tidak diketahui. Kemudian, dilakukan estimasi parameter-parameter pada fungsi suhu lingkungan serta parameter waktu kematian pada model pendinginan tubuh yang telah dimodifikasi menggunakan metode selisih kuadrat terkecil nonlinear. Dalam proses penerapan metode selisih kuadrat terkecil untuk estimasi parameter, digunakan algoritma Nelder-Mead untuk meminimasi fungsi objektif yang dihasilkan. Algoritma tersebut digunakan sebab sulit untuk mencari informasi turunan dari fungsi objektif yang diperoleh.

### 3. Simulasi

Pada tahap ini, peneliti melakukan simulasi estimasi parameter-parameter pada fungsi suhu lingkungan pada data suhu lingkungan dalam suatu interval waktu. Kemudian, hasil dari estimasi tersebut dievaluasi untuk melihat ukuran error rata-rata pada hasil estimasi. Lebih lanjut, hasil dari estimasi parameter-parameter suhu lingkungan juga digunakan untuk mengestimasi parameter waktu kematian pada model pendinginan tubuh yang telah dibangun. Estimasi ini dilakukan berdasarkan data suhu tubuh yang diukur pada rektum pada suatu interval waktu. Perlu diketahui juga bahwa kedua data yang diperlukan merupakan data teoritis yang dibangkitkan dari suatu persamaan.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Penelitian skripsi ini mengkaji masalah estimasi waktu kematian dengan pendinginan tubuh dan suhu lingkungan menggunakan metode selisih kuadrat terkecil nonlinear. Berdasarkan sistematika penulisannya, skripsi ini terdiri atas lima bab dan pada setiap babnya terdapat beberapa sub bab. Adapun sistematika penulisannya adalah sebagai berikut.

Pada Bab I dibahas mengenai pendahuluan yang memuat enam sub bahasan. Pendahuluan ini terdiri dari latar belakang masalah yang menjadi alasan pemilihan topik pada studi literatur ini, rumusan masalah yang didalamnya termuat permasalahan-permasalahan yang akan diselesaikan, pembatasan masalah yang didalamnya termuat hal-hal yang menjadi fokus utama kajian studi literatur dan uraian tentang penyempitan permasalahan yang dikaji, tujuan penulisan yang menyatakan hal-hal yang menjadi tujuan yang akan dikerjakan dalam kajian penelitian, metode penelitian yang memuat tahapan penelitian yang dilakukan dan sistematika penulisan yang memuat penjelasan bagaimana struktur skripsi ini disusun.

Kemudian, pada Bab II diuraikan materi-materi yang menjadi dasar teori untuk skripsi ini, pembahasannya meliputi ilmu forensik dan estimasi waktu kematian, model suhu Marshall-Hoare sebagai model dasar yang akan dikembangkan, metode selisih kuadrat terkecil yang merupakan metode estimasi parameter yang digunakan, algoritma Nelder-Mead yang dibutuhkan untuk membantu proses estimasi parameter, dan kajian oleh Rodrigo [1] tentang estimasi parameter waktu kematian pada model suhu Marshall-Hoare dengan menggunakan metode selisih kuadrat terkecil nonlinear.

Selanjutnya, pada Bab III dipaparkan tentang bagaimana cara mengontruksi model pendinginan tubuh dengan suhu lingkungan nonkonstan. Model ini dibangun dengan memodifikasi faktor suhu lingkungan dalam hukum Pendinginan Newton pada model suhu Marshall-Hoare [26], menjadikannya fungsi sinusoidal bergantung pada waktu dengan tiga parameter yang tidak diketahui. Selanjutnya, dilakukan estimasi parameter suhu lingkungan dan waktu kematian menggunakan metode selisih kuadrat terkecil nonlinear. Untuk meminimalkan fungsi objektif dalam estimasi parameter, digunakan algoritma Nelder-Mead, karena kesulitan dalam memperoleh turunan dari fungsi objektif tersebut.

Berikutnya, bahasan pada Bab IV pemaparan mengenai bagaimana simulasi numerik untuk estimasi parameter dilakukan. Terdapat dua simulasi numerik yang dilakukan, yakni simulasi numerik untuk estimasi parameter-parameter fungsi suhu lingkungan dan simulasi numerik untuk estimasi parameter waktu kematian. Yang pertama dilakukan adalah estimasi parameter-parameter fungsi suhu lingkungan. Kemudian, hasil estimasi tersebut dievaluasi dengan menggunakan *Root Mean Square Error*. Hasil estimasi parameter-parameter fungsi suhu lingkungan juga digunakan untuk estimasi parameter waktu kematian.

Terakhir, Bab V berisi kesimpulan yang ditulis sebagai uraian jawaban dari tujuan penelitian yang telah disampaikan pada bab sebelumnya. Selain itu, diberikan juga saran untuk pengembangan kasus lebih jauh lagi terhadap topik pada skripsi ini.