

Terapan Graf dalam Proses Pencocokan Sidik Jari

Daniar Heri Kurniawan / 13512064¹

Program Studi Teknik Informatika

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia

¹daniarherikurnia@students.itb.ac.id

Abstrak— Teori graf yang terlihat sederhana ternyata menyimpan kemampuan untuk merepresentasikan berbagai persoalan dan mampu memberikan banyak solusi untuk masalah-masalah yang ada disekitar penulis. Persoalan terpenting di dunia yang menarik untuk dikaji dan diteliti adalah bidang keamanan karena pada dasarnya setiap manusia, baik individu maupun golongan, pasti membutuhkan sistem pengamanan yang baik untuk menunjang pemenuhan kebutuhannya. Hal tersebut menempatkan bidang keamanan pada kebutuhan tingkat primer dan memaksa para ilmuwan untuk senantiasa mengembangkan metode pengamanan yang kuat. Metode keamanan yang saat ini populer dikembangkan adalah metode pengamanan preventif, yakni pengamanan yang dilakukan sebagai pencegahan tindak kejahatan. Seiring dengan berkembangnya kecanggihan teknologi, cara pengamanan preventif manual sudah mulai ditinggalkan dan ilmuwan mulai mengembangkan metode untuk verifikasi menggunakan biometrik. Sidik jari merupakan salah satu ciri unik setiap individu yang bisa digunakan untuk autentifikasi biometrik. Mengenali identitas dengan sidik jari melalui *Automatic Fingerprint Identification Systems* (AFIS) merupakan teknologi biometrik terkini yang sudah banyak diterapkan di berbagai negara dan berbagai instansi, termasuk di kampus Institut Teknologi Bandung (ITB). Makalah ini berisi tentang terapan graf dalam bidang bioinformatika, yaitu digunakan untuk mencocokkan sidik jari. Masing-masing sidik jari dibedakan dari kombinasi pola-pola unik antarbagiannya, atau dinamakan *minutiae* (*point of interest*). *Minutiae* merupakan salah satu representasi sidik jari yang dimanfaatkan untuk mencocokkan dan mengklasifikasikannya ke dalam berbagai kelas.

Kata Kunci—Keamanan, graf, sidik jari, biometrik, *minutiae*.

I. PENDAHULUAN

Mengidentifikasi seseorang menggunakan sidik jari bukanlah cara yang mudah, karena sidik jari adalah sesuatu yang unik untuk masing-masing individu dan detailnya yang sangat rumit. Dalam proses pencocokkan, suatu sidik jari harus dibandingkan dengan semua sidik jari yang sudah tersimpan. Agar proses pencocokkan bisa dilakukan dengan cepat, maka para peneliti telah mengembangkan berbagai metode untuk mengelompokkannya sehingga dimungkinkan suatu sidik

jari hanya akan dicocokkan dengan sidik jari lain yang memiliki kelas atau jenis yang sama, misalkan dengan diketahuinya data tentang jenis kelamin, tanggal lahir, golongan darah, dan sebagainya. Sebelum dilakukan proses pencocokkan, gambar hasil scan sidik jari harus diubah ke bentuk file biner dulu. Kemudian data tersebut diolah dan direpresentasikan dalam berbagai bentuk, vektor, graf, matriks, dan lain-lain. Teknik autentifikasi dengan sidik jari memang sangat bermacam-macam jenisnya, tetapi baru-baru ini telah dikembangkan teknik pencocokkan berbasis *minutiae* menggunakan representasi graf biner. Teknik yang dikembangkan diantaranya, teknik untuk proses autentifikasi sidik jari menggunakan graf *binary constraint interminutiae* dan teknik klasifikasi sidik jari yang berbasis *inexant graph*.

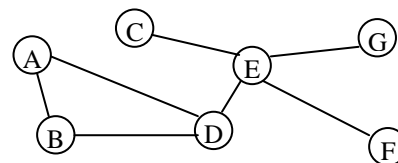
II. TEORI DASAR

2.1 Pengertian Graf

Graf sudah diperkenalkan oleh Euler sejak tahun 1736 ketika dia mempelajari masalah jembatan Konigsberg dan mengemukakan jawabannya. Dalam jawabannya itu, Euler memodelkan jembatan Konigsberg dengan suatu bentuk yang dia sebut Graf. Graf adalah struktur diskrit yang terdiri dari simpul dan sisi yang menghubungkan antarsimpul [2]. Graf G didefinisikan sebagai pasangan himpunan (V, E) , yang dalam hal ini :

- $V = \{ v_1, v_2, \dots, v_n \}$, yaitu himpunan tidak-kosong dari simpul-simpul (*node* atau *vertices*),
- $E = \{ e_1, e_2, \dots, e_n \}$, yaitu himpunan sisi (*edges* atau *ares*) yang menghubungkan sepasang simpul [6].

Di bawah ini adalah contoh graf:



Gambar 2.1 Graf dengan 7 simpul/edges.

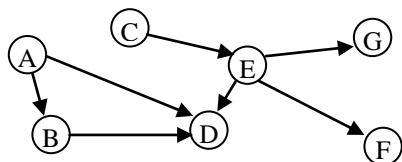
2.2 Graf Tidak Berarah

Graf yang sisinya tidak mempunyai orientasi arah disebut graf tak berarah [4]. Graf tak berarah banyak diaplikasikan dalam bidang kimia, misalnya untuk merepresentasikan bentuk molekul senyawa dengan

berbagai jenis ikatannya. Sebuah sisi pada graf tak berarah, misalnya $e_j=(A, B)$, tidak mementingkan arah sisinya, tetapi sisi tersebut lebih menekankan adanya hubungan antara node A dan B . Gambar 2.1 adalah contoh graf tak berarah.

2.3 Graf Berarah (Directed Graph)

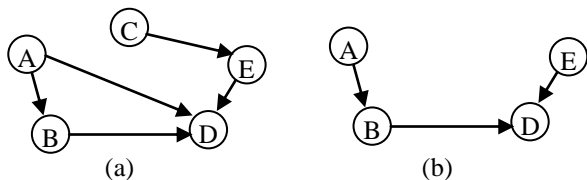
Graf yang setiap sisinya diberikan orientasi arah disebut sebagai graf berarah [6]. Graf berarah sering kali juga memiliki bobot, sehingga bisa didapatkan suatu upagraf yang memiliki bobot minimum. Graf berarah dengan bobot minimum ini memiliki banyak aplikasi yang menarik, misalnya untuk menyelesaikan masalah pencarian rute atau jalur terpendek, Gambar 2.2 adalah contoh graf berarah tak berbobot.



Gambar 2.2 Graf berarah dengan 7 simpul/edges.

2.4 Upagraf (Subgraf)

Misalkan $G = (V, E)$ merupakan sebuah graf, maka $G_1 = (V_1, E_1)$ adalah upagraf (*subgraph*) dari G jika $V_1 \subseteq V$ dan $E_1 \subseteq E$ [6]. Upagraf dapat digunakan untuk menentukan berapa persentase kemiripan suatu graf dengan graf induk atau graf utama.



Gambar 2.3 (a) Graf G . (b) Upagraf G

2.5 Graf Binary-Constraints

Algoritma pencocokan akan menerjemahkan pola-pola *minutiae* dari setiap file gambar biner. Kemudian dari hasil tersebut, akan dibentuk graf jaringan *constraint* (*binary constraint graph*) antarsemua *minutiae*. Graf tersebut terdiri dari himpunan *minutiae* dan himpunan *binary constraint*. Graf konstrain biner $G(V,E)$ merupakan graf yang tidak berarah. Simbol V merupakan himpunan variabel yang merepresentasikan semua *minutiae*, sedangkan E adalah sisi yang menghubungkan pasangan *minutiae*.

Menurut Benhammadi [1], jika $G(V,E)$ merupakan graf *binary-constraints* maka terdapat C yang menggambarkan hubungan antardua *minutiae*. Selain itu juga terdapat $T = \{m_i, i = 1, \dots, n\}$ yang merupakan list hasil penerjemahan *minutiae* dari gambar sidik jari. Secara umum, jaringan *interminutiae-constraint* didefinisikan sebagai berikut:

- (i) sebuah himpunan dari n *minutiae* (variabel): $i = 1, \dots, n$

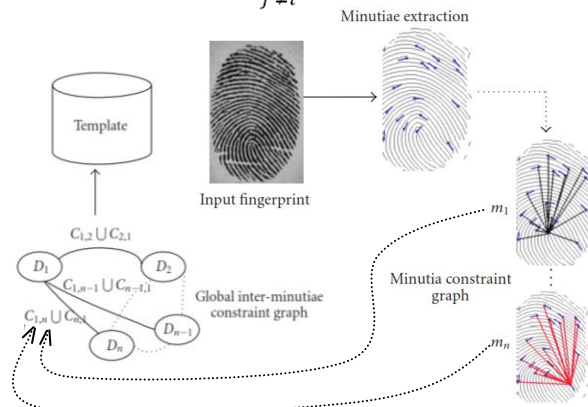
- (ii) untuk setiap *minutiae* m_i , sebuah domain d_i dari $n - 1$, $d_i = \{(r_{ij}, \alpha_{ij}) \mid j = 1, \dots, n, j \neq i\}$, terdapat $\{(r_{ij}, \alpha_{ij})$ yang sebelumnya dihitung.

- (iii) untuk setiap pasang *minutiae* $\{m_i, m_j\}$, $i \neq j$, *binary-constraint* $C_{i,j}$, yang merupakan himpunan bagian dari $d_i \times d_j$, ada. Dengan kata lain *binary-constraint* :

$$C_{i,j} = ((r_{ij}, r_{ji}), (\alpha_{ij}, \alpha_{ji})),$$

- (iv) untuk setiap *minutiae* m_i , relasi constrain C_i didefinisikan untuk menggambarkan hubungan antara *minutiae* m_i dengan pasangannya sesuai :

$$C_i = \bigcup_{j \neq i}^n C_{i,j}$$



Gambar 2.4 Template sidik jari digeneralisasi dengan graf *constraint-interminutiae* global yang merepresentasikan jaringan hubungan antar *minutiae* [1].

2.6 Representasi Graf Sidik Jari

Sidik jari yang telah diambil gambarnya dapat diolah menjadi berbagai macam tipe representasi, salah satunya adalah ke dalam bentuk graf. Representasi sidik jari dalam bentuk graf cukup menarik karena hal ini tidak mudah untuk dilakukan dan penelitian akan hal ini masih terus dikembangkan. Hingga saat ini, graf dapat merepresentasikan sidik jari berdasarkan pada *minutiae* yang terdapat dalam gambar biner sidik jari. Setiap *minutiae* dihubungkan dengan pasangannya sesuai dengan aturan tertentu kemudian dari graf tersebut dapat dianalisis jenis atau tipe masing-masing sidik jari. Dengan adanya pengelompokan data sidik jari, maka proses pencocokan akan lebih efektif dan cepat.

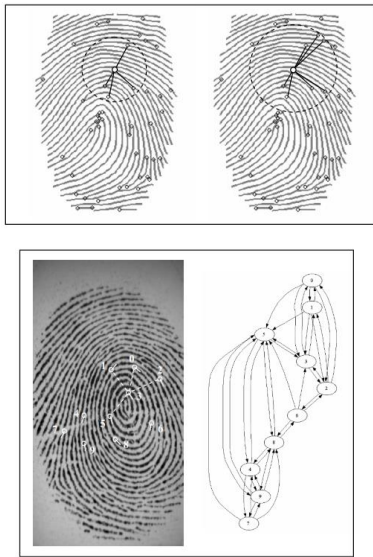


Gambar 2.5. Graf sidik jari [3]

2.7 Terapan Graf

Graf sangat menarik untuk dipelajari karena terapannya dalam kehidupan sehari-hari sangat banyak. Meskipun terlihat sederhana graf memiliki banyak aplikasi dalam kehidupan nyata, diantaranya adalah : pada permodelan struktur organisasi, peta, diagram rangkaian listrik,

senyawa kimia, dan juga pada pemrosesan sidik jari. Pemrosesan sidik jari bukanlah sesuatu yang sederhana, sehingga membutuhkan banyak pendekatan dan metode-metode khusus dalam keilmuannya. Pada pemrosesan sidik jari, penggunaan graf terbagi menjadi dua macam, yaitu graf berbobot dan tak berbobot. Hal tersebut didasarkan pada jenis pendekatan dan data yang digunakan untuk memproses suatu sidik jari, misalnya ketika data yang diproses mengandung data tentang jarak antar-*minutiae*, maka graf yang digunakan untuk merepresentasikan jarak antar-*minutiae* merupakan directed graf. Berbagai macam teknik pendekatan yang digunakan untuk mengolah file gambar biner sidik jari bisa menghasilkan dua tipe pendekatan umum, yaitu yang berbasis *minutiae* dan *non-minutiae*. Lebih detail tentang pendekatan tersebut akan dibahas penulis pada bagian 2.13 dan 2.14.



Gambar 2.4 Contoh penyederhanaan karakteristik sidik jari dengan graf [4].

2.8 Matriks Ketetangaan

Untuk merepresentasikan graf ada berbagai macam, tetapi yang paling sederhana adalah dengan matriks ketetangaan.

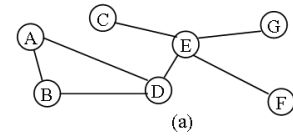
$$A = [a_{ij}], a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{jika simpul } i \text{ dan } j \text{ bertetangga} \\ 0, & \text{jika simpul } i \text{ dan } j \text{ tidak bertetangga} \end{cases}$$

Ketika diwujudkan dalam suatu struktur data, masing-masing representasi mempunyai kelebihan dan kekurangan. Jika menggunakan struktur data matriks ketetangaan, kekurangannya adalah sulit untuk menambah node baru, karena ukuran matriksnya harus diubah. Sehingga cara yang paling mudah untuk merepresentasikan graf data sidik jari yaitu dengan struktur data senarai berkait atau list berkait. Senarai atau list berkait bisa dengan mudah mengalokasikan ruang memory baru tanpa mengganggu data yang sebelumnya sudah tersimpan. Beberapa faktor yang harus dipertimbangkan ketika memilih representasi graf yaitu :

bahasa pemrograman yang dipakai dan pemrosesan apa yang sering dilakukan.

	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	0	1	0	0	0
B	1	0	0	1	0	0	0
C	0	0	0	0	1	0	0
D	1	1	0	0	1	0	0
E	0	0	1	1	0	1	1
F	0	0	0	0	1	0	0
G	0	0	0	0	1	0	0

(b)



Gambar 2.5 (a) Graf G, (b) Matriks ketetangaan Graf G

2.9 Singularitas Matriks

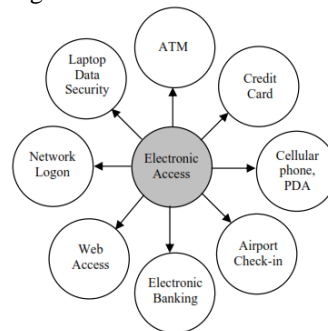
Matriks yang tidak memiliki invers dinamakan matriks singular. Keesingularitasan dapat dicek dengan menghitung determinan matriks tersebut. Jika determinannya $\neq 0$, maka bisa dipastikan matriks tersebut bukan matriks singular. Contoh matriks singular, yaitu :

$$S = \begin{bmatrix} -2 & -2 & 4 \\ 0 & 0 & 2 \\ -2 & -2 & 5 \end{bmatrix}$$

$$|S| = -2(0) + 2(0) + 4(0) = 0$$

2.10 Sidik Jari

Sidik jari merupakan salah satu dari berbagai jenis pengenalan identitas dengan biometrik (*Biometrix recognition*). Pengenal biometrik yang paling banyak digunakan saat ini adalah sidik jari, karena sidik jari tiap orang unik dan sangat alamiah, semua orang mempunyai sidik jari sejak berumur 7 bulan dalam kandungan [4]. Sidik jari sangat membantu dalam bidang forensik dan keamanan. Biasanya sebuah sistem keamanan tidak hanya menggunakan satu jenis pengenal biometrik saja, tetapi menggunakan kombinasi antarbiometrik. Misalnya autentifikasi biometrik dengan mengenali sidik jari dan iris mata. Uji autentifikasi atau kecocokan akan menyatakan apakah seseorang layak memasuki area tertentu atau menggunakan fasilitas tertentu sesuai hak dia yang sebenarnya. Dibalik keuntungan yang ditawarkan, ada sisi kelemahannya juga, yaitu ketika orang-orang tak bertanggung jawab sengaja memburu sidik jari dan biometrik lain dari seseorang untuk mendapatkan hak akses secara ilegal.

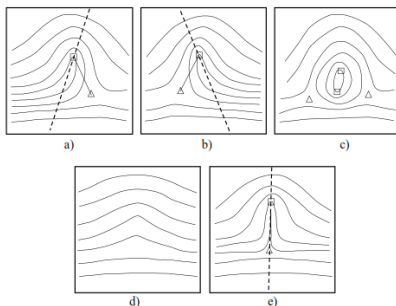


Gambar 2.6 Berbagai macam penggunaan sidik jari [4].

2.11 Pola Sidik Jari

Sidik jari terbentuk sejak bulan ke-7 dari masa kehamilan [4]. Sidik jari tidak akan berubah seumur hidup, kecuali karena kecelakaan tertentu. Sehingga sidik jari sudah sepatasnya jika digunakan untuk memvalidasi identitas seseorang. Untuk mempermudah proses pencocokkan, banyak ilmuwan yang sudah mengklasifikasikan sidik jari menjadi beberapa jenis berdasarkan polanya. Orang yang tidak mendalami ilmu tentang sidik jari pasti akan kesulitan untuk mengenali polanya. Proses untuk mengenali pola ini sangat penting, karena pencocokkan antarsidik jari didasarkan pada pola ini.

Ada berbagai macam pemindai yang dapat memindai sidik jari. Masing-masing alat memiliki kekurangan dan kelebihan. Namun yang pasti menguntungkan yaitu jika gambar yang dihasilkannya jelas (dengan resolusi tinggi), sehingga mempermudah proses pengenalan pola dengan *image recognition*.

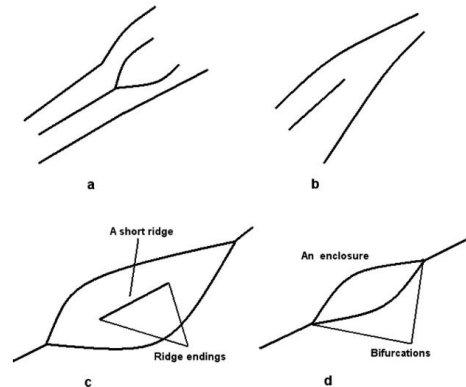


Gambar 2.7 Pola sidik jari secara kasar: a) loop kiri, b) loop kanan, c) lingkaran, d) lengkungan, e) lengkungan berbentuk tenda; kotak menyatakan loop tipe *singular points*, dan segitiga menyatakan tipe *singular points* delta [4].

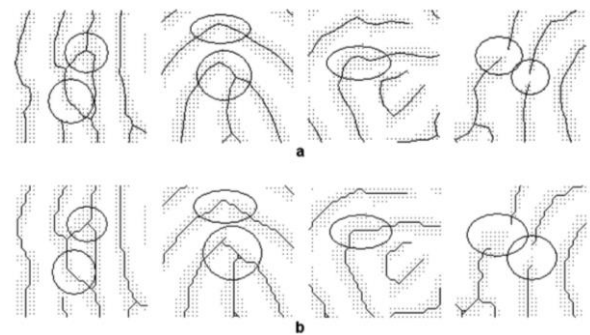
2.12 Minutiae

Penggunaan sidik jari sebagai bagian autentifikasi dan identifikasi diri sudah tidak asing lagi. Hal itu karena hingga saat ini pembuatan sidik jari sintetis masih cukup sulit, sehingga tindak kriminal tentang pemalsuan sidik jari juga masih sangat jarang. Tidak seperti keunikan yang biasa diciptakan manusia, tetapi keunikan sidik jari benar-benar khas dan kompleks. Keunikan sidik jari disusun dari keunikan-keunikan dasar pada bagian pola garisnya. Keunikannya bisa dipelajari dengan berbagai jenis pendekatan, salah satunya adalah pendekatan berbasis *minutiae*. *Minutiae* merupakan pola tertentu pada setiap daerah sidik jari. Pada awalnya file gambar hasil scan masih belum bisa diolah, kemudian file tersebut harus diubah menjadi file biner agar dapat menentukan tipe-tipe *minutiae*-nya. File biner belum dapat menggambarkan garis-garis sidik jari dengan baik, sehingga diperlukan algoritma penyempitan untuk memperoleh hasil yang maksimal. Namun ada algoritma yang lebih presisi [5], yaitu algoritma graf prinsipal. Algoritma ini secara umum terbagi dalam tiga tahap, yaitu: inisialisasi, penyesuaian-penghalusan, dan penyusunan ulang [5]. Dengan

menggunakan algoritma graf prinsipal, hasil yang diperoleh lebih bagus.



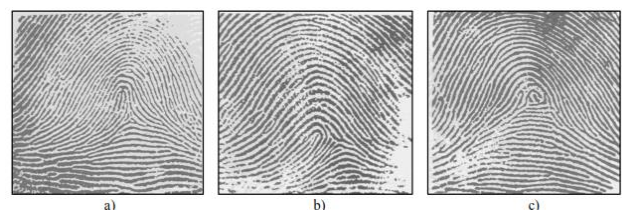
Gambar 2.9 contoh *minutiae*. a. percabangan, b. ujung, c. garis pendek, d. tertutup.



Gambar 2.9 Perbandingan kerangka dari file biner yang diterjemahkan dengan algoritma penyempitan dan algoritma graf prinsipal. (a) kerangka dari sidik jari yang diterjemahkan menggunakan algoritma graf prinsipal. (b) kerangka dari sidik jari yang diterjemahkan menggunakan algoritma penyempitan [5].

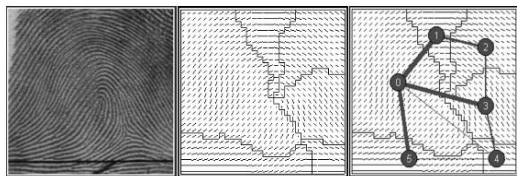
2.13 Teknik Klasifikasi Sidik Jari

Seiring dengan semakin banyaknya jumlah sidik jari yang disimpan oleh suatu penyimpan sidik jari, maka proses pengklasifikasian sangat dibutuhkan untuk mengurangi kompleksitas pemrosesan. Pengelompokan atau pengklasifikasian sidik jari merupakan suatu teknik untuk menandai dan memisahkan setiap sidik jari berdasarkan tipe tertentu. Teknik klasifikasi yang paling terkenal diperkenalkan oleh Henry, yang terdiri dari 5 kelas utama (lihat gambar 2.7) [4]. Namun ternyata teknik ini menyebabkan keambiguitasan, karena tidak semua sidik jari bisa dikelompokkan hanya dalam 5 kelas tersebut.



Gambar 2.10 Contoh sidik jari yang sulit untuk diklasifikasikan. Semuanya nampak cocok jika diklasifikasikan sebagai tipe loop [4].

Untuk menyelesaikan masalah ambiguitas itu, maka ilmuwan dan pakar sidik jari mengembangkan teknik pengindekan atau pengklasifikasian yang baru. Salah satu tekniknya adalah dengan pendekatan struktural. Pendekatan struktural berdasar pada hubungan antarbagian pada level sederhana dengan struktur level tinggi. Relasi atau hubungan ini direpresentasikan dalam struktur data simbol, misalnya pohon dan graf, yang dapat mengatur hierarki informasi.



Gambar 2.11 Pendekatan untuk proses klasifikasi yang diperkenalkan oleh Maio dan Maltoni [2].

2.14 Pencocokkan Sidik Jari

Proses utama setelah pengklasifikasian adalah proses pencocokkan sidik jari *input* (**I**) dengan template (**T**). Pencocokkan gambar sidik jari merupakan proses yang sangat sulit dan membutuhkan waktu yang cukup lama jika tidak ditangani oleh sistem yang baik. Untuk meningkatkan efektifitas pencocokkan atau autentifikasi, dilakukanlah proses pengindekan atau pengelompokkan dengan berbagai metode yang sudah penulis jelaskan pada bagian 2.23. Untuk membandingkan dua sidik jari yang jelas-jelas berasal dari satu orang terkadang tidak mudah, karena ada faktor-faktor yang menyebabkan perbedaan, yaitu :

- pergerakan: Jari yang sama mungkin ditempatkan di lokasi yang berbeda ketika menyentuh sensor. Jari yang bergeser 2 mm bisa menyebabkan pergeseran 40 pixel pada gambar hasil pemindaian yang beresolusi 500 dpi.
- perputaran: Jari mungkin diletakkan pada sudut yang berbeda-beda ketika dipindai.
- ada permukaan jari yang tidak terpindai.
- tekanan dan kondisi kulit
- gangguan lain yang menyebabkan kurang jelasnya hasil pemindaian, mungkin karena bekas sidik jari sebelumnya di alat pemindai [4].

Untuk meminimalkan gangguan-gangguan itu, dikembangkanlah suatu metode pencocokkan yang secara umum terbagi menjadi 3 macam :

- *Correlation-based matching*: Mencocokkan **T** dengan **I** berdasarkan jumlah kuadrat perbedaan intensitas pixel yang cocok.
- *Minutiae-based matching*: Metode yang paling banyak digunakan di dunia, yaitu dengan merepresentasikan pola-pola sidik jari ke dalam bentuk vektor yang berisi koordinat dan sudutnya.
- *Non-minutiae feature-based matching*: Yang termasuk dalam metode ini adalah metode *local structure matching*.

III. PROSES AUTENTIFIKASI SIDIK JARI DENGAN GRAF *BINARY-CONSTRAINTS INTERMINUTIAE*

Seperti yang penulis jelaskan di awal mengenai kegunaan graf, berikut ini adalah salah satu contoh penggunaannya yang sangat penting dalam bidang biometrik sidik jari. Algoritma pencocokkan untuk proses autentifikasi ini memanfaatkan graf *binary-constraint* (bagian 2.5). Pada awalnya file gambar hasil scan diubah menjadi file gambar biner. Setelah itu *minutiae constraint graph* dapat dibentuk dari hasil pembacaan pola-pola pada file biner tersebut. Pola-pola tersebut dibaca atau dipindai berdasarkan pada pola masing-masing garis pada sidik jari.

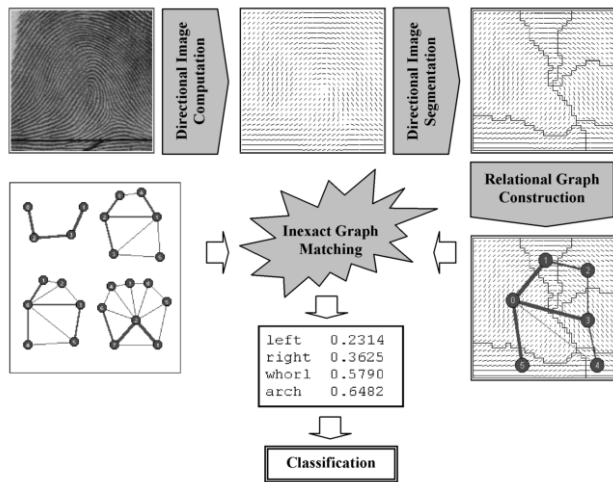
Graf *minutiae* yang telah terbentuk kemudian dibandingkan dengan graf *minutiae* pada template yang tersimpan. Proses pencocokkan dan pengklasifikasiannya dapat dipelajari lebih lengkap di [1]. Setelah melalui proses pencocokkan, tingkat kecocokannya akan di nilai berdasarkan hasil algoritma pencarian *backtracking*. Teknik ini memiliki keuntungan dalam hal kesederhanaan proses pencocokkan file input dengan file sidik jari di *database* (template). Proses autentifikasi sidik jari dengan graf *binary-constraint interminutiae* tidak memerlukan lagi pengaturan secara implisit dua gambar sidik jari seperti pada teknik-teknik sebelumnya. Selain itu, teknik ini juga telah meningkatkan efektifitas algoritma *backtracking-search*.

```

Function Backtracking_Search (Split(M), Constraints) returns a solution, or failure
    return Recursive_Backtracking({}, Split(M), Constraints)
Function Recursive_Backtracking (A_M, Split(M), Constraints [A_M]) returns a solution, or failure
If Split(M) = ∅ then return assignment A_M
matched_minutia ← m'_j // Select-unassigned-minutia m'_j from the set Split(M).
Split(M) ← Split(M) - {(m'_j, S_{m'_j})}
For each minutia m'_j in Order-Domain-Minutiae(matched_minutia, A_M, Constraints [A_M]) do
    If m'_j is consistent with assignment A_M according to Constraints [A_M] then
        Suppress the minutia m'_j from all S_{m'_k} sets belonging to the Split(M) set for k ≠ j
        A_M ← A_M ∪ {matched_minutia ← m'_j} // Add matched minutiae pair {m'_j ← m'_j} to assignment A_M
        result ← Recursive_Backtracking (A_M, Split(M), Constraints[A_M])
        If result ≠ failure then return result
        remove matched_minutia ← m'_j from assignment A_M
Return failure
    
```

Sumber : [1]

Selain penggunaan graf dalam teknik autentifikasi sidik jari dengan graf *binary-constraint interminutiae* tersebut, sebenarnya masih banyak terapan lainnya, misalnya untuk proses autentifikasi yang berdasarkan kesamaan struktur lokalnya dan juga untuk proses klasifikasi dengan teknik *inexact-graph mathing*. Berikut ini adalah alur proses klasifikasi dengan teknik *inexact-graph mathing*.



Gambar 2.12 Pendekatan struktural berdasarkan graf relasional [2].

IV. HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan studi literatur yang telah penulis lakukan, penulis menemukan banyak terapan graf pada bidang biometrik sidik jari. Teori-teori graf, $G = (V, E)$, dapat dimanfaatkan untuk merepresentasikan vertek yang mewakili hasil ekstraksi *minutiae* dari gambar biner sidik jari. Dalam terapannya, komponen graf yang terdiri dari vertek dan simpul atau *edge* tidak hanya menyimpan data tunggal, tapi juga bisa digunakan untuk merepresentasikan data tuple. Setiap vertek ('V') bisa menyimpan bermacam-macam data bergantung jenis pendekatan yang digunakan untuk mengekstraksi *minutiae*-nya. Sedangkan *edge* ('E') digunakan untuk menggambarkan keterkaitan antar *minutiae* sebagai satu kesatuan yang unik. Edge atau sisi bisa digunakan untuk menyimpan keterangan relasional antarpasangan *minutiae*, misalnya jarak, arah, dan sebagainya.

Proses pencocokkan dan pengklasifikasian data sidik jari ada bermacam-macam yang masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan sendiri. Salah satu teknik pencocokkan yang paling populer di dunia adalah teknik yang berbasis *minutiae*. Teknik tersebut semakin berkembang dan akhirnya sekarang banyak ilmuwan yang mengembangkan metode berbasis graf dalam mengolah *minutiae* tersebut.

Pada proses autentifikasi sidik jari dengan graf *binary-constraint interminutiae*, simpul graf digunakan untuk merepresentasikan setiap *minutiae*. Sedangkan sisinya digunakan untuk menggambarkan keterhubungan antarpasangan *minutiae*. Dalam representasi tersebut, graf

juga harus merepresentasikan arah vektor dari pasangan *minutiae* sehingga graf hasil representasinya adalah graf berarah atau *directed-graph*. Selain autentifikasi sidik jari dengan graf *binary-constraint interminutiae*, terdapat terapan graf yang lain pada proses klasifikasi yang menggunakan pendekatan *inexact-graph matching*, dan proses autentifikasi yang berdasarkan kesamaan struktur lokal.

V. KESIMPULAN

Salah satu materi kuliah Matematika Diskrit, yaitu graf, sangat mudah kita temui terapannya di kehidupan sehari-hari mulai dari yang paling sederhana, misalnya untuk menggambarkan struktur organisasi, hingga sesuatu yang rumit seperti dalam biometrik sidik jari ini. Graf dapat dimanfaatkan untuk merepresentasikan hasil ekstraksi data dari file biner sidik jari menjadi bentuk atau struktur data yang mudah diolah untuk proses pencocokkan dan proses klasifikasi.

Pada proses autentifikasi sidik jari dengan graf *binary-constraint interminutiae*, simpul graf digunakan untuk merepresentasikan setiap *minutiae*. Sedangkan sisinya digunakan untuk menggambarkan keterhubungan antarpasangan *minutiae*. Dalam representasi tersebut, graf juga harus merepresentasikan arah vektor dari pasangan *minutiae* sehingga graf hasil representasinya adalah graf berarah atau *directed-graph*. Selain autentifikasi sidik jari dengan graf *binary-constraint interminutiae*, terdapat terapan graf yang lain pada proses klasifikasi yang menggunakan pendekatan *inexact-graph matching*,

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan makalah ini tepat pada waktunya. Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada Dra. Harlili dan Dr. Rinaldi Munir selaku dosen mata kuliah Matematika Diskrit yang telah mengajarkan banyak ilmunya kepada penulis. Selain itu penulis juga mengucapkan terima kasih kepada orang tua penulis dan semua pihak, yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu, yang telah membantu penulis dengan bantuan moril maupun materil.

REFERENSI

- [1] Benhammadi F., Hentous H., and Bey Beghdad, "A Fingerprint Recognizer Using Interminutiae Binary Constraint Graph", 2007
- [2] Cappelli R., Lumini A., Maio D. and Maltoni D., "Fingerprint classification by directional image partitioning," *IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1999.
- [3] David Adam Braude, "Fingerprints: Orientation Free Minutiae Extraction and Using Distances Between Minutiae for Identification and Verification", Johannesburg, 2010.
- [4] Maltoni D., Maio D., A. K. Jain, and Prabhakar S., *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, second ed., 2009.
- [5] Miao D., Tang Q. and Fu W., "Fingerprint minutiae extraction based on principal curves," *Pattern Recognition Letters*, vol. 28, 2007.

- [6] Munir, Rinaldi. *Matematiaka Diskrit* (Edisi Kedua). Bandung: Informatika Bandung, 2003, bab 8.
- [7] Ratha N.K., Pandit V.D., Bolle R.M. and Vaish, V., "Robust Fingerprint Authentication Using Local Struktural Similarity," 2000.
- [8] Rosen, Kenneth H., *Discrete Mathematics and Its Application*, 4th. New York: McGraw-Hill, 2009.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 15 Desember 2013



Daniar Heri Kurniawan
13512064