

PEMODELAN PENCOCOKAN CITRA MENGUNAKAN PENDEKATAN *GRAPH MATCHING*

RINGKASAN DISERTASI

Akmal

NIM: 33216003

(Program Studi Doktor Teknik Elektro dan Informatika)



INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Juli 2023

PEMODELAN PENCOCOKAN CITRA MENGUNAKAN PENDEKATAN *GRAPH MATCHING*

Disertasi ini dipertahankan pada Sidang Tertutup Sekolah
Pascasarjana sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor Institut Teknologi Bandung

Juli 2023

Akmal

NIM: 33216003

(Program Studi Doktor Teknik Elektro dan Informatika)



Promotor : Dr. Ir. Rinaldi Munir, M.T.

Ko Promotor : Dr. Judhi Santoso, M.Sc

INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

Juli 2023

PEMODELAN PENCOCOKAN CITRA MENGUNAKAN PENDEKATAN *GRAPH* *MATCHING*

Akmal
NIM 33216003

1. Latar Belakang

Dalam dua dekade terakhir telah terjadi ledakan pertumbuhan produksi citra mulai dari foto digital hingga citra scan medis, citra satelit, dan film video. Akibatnya, jumlah aplikasi berbasis citra digital telah meningkat secara drastis, termasuk integrasi multimedia, animasi komputer, video game, komunikasi dan seni digital, kedokteran, biometri, dan lain-lain. Meskipun sangat berbeda satu sama lain, semua bidang aplikasi ini bergantung pada hal yang sama yaitu pengolahan citra dan teknik analisis citra. Bidang analisis pemrosesan citra atau video sangat luas, meliputi berbagai macam masalah penelitian dari pemrosesan tingkat rendah (seperti *image enhancement*, restorasi, dan segmentasi) hingga analisis tingkat tinggi (ekstraksi semantic objek, pengindeksan basis data citra, dan interaksi komputer-manusia)

Secara umum tahap-tahap dalam analisis citra adalah (1) tahap pengambilan citra (*image acquisition*), (2) tahap *preprocessing* berupa perbaikan citra yang bisa berupa operasi titik, operasi spasial, operasi geometri, dan operasi aritmetika, (3) tahap segmentasi yang membagi citra menjadi *region-region* yang berbeda, (4) tahap ekstraksi fitur untuk mendapatkan informasi ciri dan karakteristik yang paling relevan dari citra dan (5) tahap klasifikasi dan pengenalan objek untuk mengkategorikan serta mengidentifikasi objek-objek dalam citra.

Graf telah muncul sebagai representasi terpadu untuk pemrosesan dan analisis citra. Jumlah konsep yang dapat didefinisikan dengan graf sangat banyak. Secara khusus, banyak masalah dunia nyata telah berhasil dimodelkan menggunakan graf. Konsekuensinya, teori graf telah menemukan banyak perkembangan dan aplikasi untuk pemrosesan dan analisis citra, terutama karena kesesuaian graf untuk merepresentasikan data diskrit dengan memodelkan hubungan ketetanggaan. Model graf yang berbeda telah diusulkan untuk analisis citra, tergantung pada struktur yang akan dianalisis. Namun, graf tidak hanya menarik untuk mewakili data yang akan diproses, tetapi juga untuk mendefinisikan algoritma teoretis graf yang memungkinkan pemrosesan fungsi yang terkait dengan graf. Selain itu, merepresentasikan masalah dengan graf memungkinkan untuk memanfaatkan literatur yang kaya tentang optimisasi kombinatorial untuk menghasilkan solusi yang sangat efisien. Representasi berbasis graf telah digunakan setidaknya sejak

akhir 1970-an untuk pengenalan pola pada objek citra, bentuk 2D / 3D, dokumen, simbol dan karakter. Selain itu juga digunakan pada struktur kimia atau biologis, konten web semantik, jaringan sosial dan ekonomi, dan banyak lagi Akibatnya, graf menjadi sangat diperlukan untuk pengembangan penelitian dan aplikasi mutakhir dalam pemrosesan dan analisis citra.

Graf merupakan struktur diskrit yang digunakan untuk mewakili informasi terstruktur, yaitu informasi yang terdiri dari entitas yang direpresentasikan sebagai simpul graf dan hubungan biner antara entitas yang direpresentasikan sebagai sisi graf. Ada beberapa alasan mengapa pengolahan dan analisis citra dilakukan dengan berbasiskan graf, antara lain karena (1) representasinya sederhana sehingga cocok untuk pengembangan metoda yang efisien. (2) Memiliki fleksibilitas dalam merepresentasikan berbagai macam tipe citra. (3) Algoritma dan teorema teori graf yang ada bisa dikembangkan kembali untuk digunakan dalam bidang analisis citra. (4) Adanya penambahan informasi *high level* (relasi ketetanggaan) pada representasi low level (berkaitan dengan masalah *semantic gap*).

Pendekatan dengan cara melakukan ekstraksi graf dari citra merupakan pendekatan yang selain merepresentasikan konten citra juga memperlihatkan hubungan antar konten citra tersebut. Hal ini berbeda dengan pendekatan tradisional yang hanya merepresentasikan konten saja yang dirasakan kurang efektif. Ekstraksi graf merupakan tahap awal dalam proses analisis citra berbasis graf sekaligus menjadi dasar untuk dilakukannya pengolahan lebih lanjut pada tahap-tahap berikutnya, walaupun hal ini bukanlah sebuah tugas yang mudah untuk dilakukan.

Hasil ekstraksi graf dari setiap citra yang representasinya berbentuk *Region Adjacency Graph (RAG)* akan diolah dalam proses lebih lanjut berupa **pencocokan citra**. Dasar utama dalam kegiatan ini adalah *Graph Matching* yang dilakukan untuk mencari kesamaan atau kemiripan dari dua buah graf. *Graph Matching* adalah proses mengevaluasi kesamaan antara dua graf dengan membandingkannya untuk menemukan korespondensi yang bersesuaian antara simpul-simpul dan sisi-sisinya. Hal ini mengacu pada proses pencarian pemetaan dari simpul-simpul suatu graf ke simpul-simpul dari graf lain yang memenuhi beberapa batasan atau kriteria optimalitas, dan memastikan bahwa substruktur serupa dalam satu graf dipetakan ke substruktur serupa di bidang lainnya.

Terdapat dua pendekatan dalam *Graph Matching* yaitu, *Graph Matching* yang *exact* dan *inexact* (atau toleransi error). Pendekatan yang pertama bertujuan untuk menemukan korespondensi yang ketat antara dua graf untuk dicocokkan, dan yang kedua mampu mengatasi kesalahan dan mengukur perbedaan dua graf dalam arti yang lebih luas. *Graph Matching* yang *inexact* telah menjadi topik penelitian yang sangat signifikan dalam bidang analisis pola untuk waktu yang lama. *Graph Edit*

Distance (GED) adalah dasar dari *inexact Graph Matching* dan telah menjadi suatu cara yang penting untuk mengukur kesamaan antara dua graf dengan memberikan toleransi terhadap adanya kesalahan

Untuk **meningkatkan kinerja** dari pencocokan citra dengan menggunakan pendekatan *Graph Matching* maka fitur visual berupa fitur *low level* seperti warna, tekstur dan bentuk akan digunakan dengan mengkombinasikan fitur dasar tersebut dengan fitur graf. Fitur visual berupa fitur warna, fitur tekstur dan dan fitur bentuk merupakan fitur yang paling umum dan populer digunakan. Ide dari penggabungan metoda *Graph Matching* dengan memanfaatkan fitur visual citra karena melihat dan membandingkan dengan teknik-teknik yang digunakan dalam temu balik citra dimana banyak pekerjaan yang telah dan masih dilakukan untuk mendapatkan model proses temu balik citra yang efektif dan efisien terutama dengan menggabungkan atau mengkombinasikan berbagai macam fitur citra. Fitur-fitur visual yang digabungkan diatur dengan pembobotan tertentu yang bisa dilakukan dengan pembobotan manual atau dengan pembobotan secara otomatis menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan (JST).

Berdasarkan hal-hal yang dijelaskan di atas maka dalam disertasi ini akan dikembangkan suatu pemodelan untuk pencocokan citra dengan menggunakan pendekatan *Graph Matching* yang dikombinasikan dengan pemanfaatan fitur warna, fitur bentuk dan fitur tekstur

1. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah melakukan pemodelan pencocokan citra secara efektif dan efisien dengan menggunakan pendekatan *Graph Matching* dikaitkan dengan waktu pemrosesan yang cepat dan hasil yang tepat serta akurat (berdasarkan pengukuran tertentu).

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Melakukan ekstraksi fitur untuk mencari fitur-fitur citra berupa fitur graf dan fitur visual yang akan digunakan dalam proses pencocokan citra
2. Mengusulkan suatu *framework* untuk melakukan suatu pencocokan citra dengan pendekatan *Graph Matching* yang digabungkan dengan pemanfaatan fitur warna, tekstur dan bentuk.

3. Metode Penelitian

Dalam rangka menjawab pertanyaan penelitian dan untuk tercapainya tujuan yang diinginkan maka dilakukan metodologi penelitian sebagai berikut :

1. Melakukan studi pustaka tentang hal-hal yang berkaitan dengan segmentasi, ekstraksi graf dan pencocokan citra baik yang berbasis graf ataupun yang berbasis *non graf*. Mengidentifikasi dan memilih metoda-

metoda segmentasi berbasis graf yang paling cocok untuk mengekstraksi graf dari citra dengan bentuk representasinya adalah *Region Adjacency Graph* (RAG) dan bisa digunakan untuk tahap pencocokan citra dengan efisien.

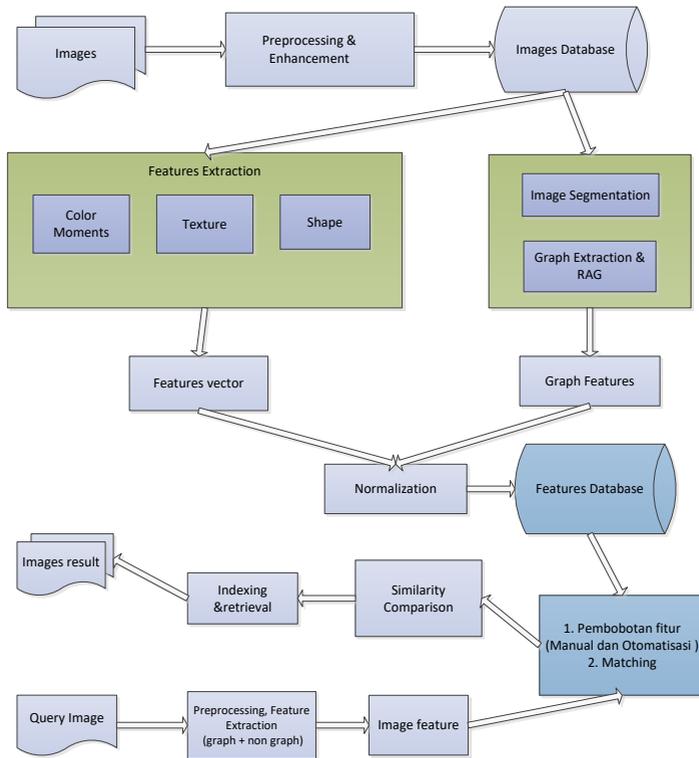
2. Mengembangkan suatu *framework* untuk pencocokan citra menggunakan metoda *Graph Matching* yang dikombinasikan dengan fitur visual citra berupa fitur warna, tekstur dan bentuk. Framework ini menjadi acuan dalam pencocokan citra yang dilakukan. Selain itu digunakan metoda jaringan syaraf tiruan *Multi Layer Perceptron* (MLP) untuk mencari bobot otomatis dari fitur visual citra tersebut yang dikombinasikan dengan metoda *Graph Matching* dalam melakukan pencocokan citra.
3. Mengimplementasikan model yang dibuat dalam bentuk suatu prototype dan mengevaluasi tahap-tahap serta model yang dikembangkan.

4. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini membahas tentang penerapan *Graph Matching* dalam temu balik citra yang dilakukan dengan mengkombinasikannya dengan fitur *visual low level* yaitu fitur warna, fitur tekstur dan fitur bentuk. Tujuan dari pengkombinasian ini adalah untuk meningkatkan akurasi. Sementara itu pembobotan dari fitur-fitur dilakukan secara manual dan juga secara otomatis menggunakan metoda Jaringan Syaraf Tiruan (JST). Selanjutnya akan diuji dan dievaluasi model yang diusulkan.

4.1 Framework Temu Balik Citra

Framework yang dibuat merupakan kerangka kerja yang menjadi acuan dalam mengembangkan *prototype* temu balik citra yang dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. *Framework* temu balik citra berbasis kombinasi metoda berbasis graf dan non graf

Secara umum proses temu balik yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. User terlebih dahulu memasukkan formasi kueri berupa suatu citra
- b. Citra kueri tersebut di ekstraksi sehingga menghasilkan vektor fitur baik fitur graf dan non graf
- c. Data citra yang tersimpan dalam database akan mengalami struktur yang sama seperti formasi kueri sehingga ditemukan vektor fitur. Pembentukan *Region Adjacency Graph* (RAG) yang tepat akan sangat menentukan dalam pencarian fitur graf.
- d. Dilakukan proses normalisasi dari fitur-fitur citra baik yang berbasis graf dan non graf sehingga memungkinkan nantinya untuk memberikan parameter prosentase bobot dari setiap metoda dalam pengolahan pengukuran similarity. Bobot yang diberikan tergantung dari jenis citra yang akan diolah. Parameter bobot bisa dilakukan secara manual atau

dengan pencarian bobot yang dilakukan secara otomatis menggunakan metoda jaringan syaraf tiruan.

- e. Dibandingkan satu sama lain untuk mencari nilai *similarity*.
- f. Setelah proses perbandingan tersebut, maka akan terpilih beberapa citra yang memiliki nilai-nilai vektor yang sama atau hampir sama
- g. Dilakukan *indexing* dan temu balik data yang telah terpilih tadi
- h. Ditemukan urutan citra dalam database yang memiliki kesamaan dengan citra kueri yang sesuai dengan keinginan user.

4.2 Pemodelan Temu balik Citra dengan Kombinasi Metoda *Graph Matching* dengan *Color Moment*, *GLCM* dan *Hu Moment*

Bobot $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ diberikan pada fitur warna menggunakan metoda *Color Moment*, fitur bentuk dengan *Hu Moment*, fitur tekstur dengan *GLCM*, dan fitur graf dengan *Graph Edit Distance* yang akan menghasilkan nilai kemiripan gabungan antara metode berbasis non graf dan metode berbasis graf. Dalam skenario ini, semua nilai vektor fitur telah dinormalisasi sehingga nilai fitur berada pada kisaran [0..1].

$$sim = \omega_1 d_{mom}(A, B) + \omega_2 d_{hu}(A, B) + \omega_3 d_{glcm}(A, B) + \omega_4 d_{ged}(A, B)$$

Bobot $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ untuk *Color Moment*, *Hu Moment*, dan *GLCM* akan dicari secara otomatis menggunakan jaringan syaraf tiruan dengan metoda *multi layer perceptron* (MLP). Adapun jarak antara dua citra fitur diukur menggunakan *Euclidean Distance* untuk *Color Moment*, *hu Moment*, *GLCM*, dan *GED* yaitu:

$$d_x(A, B) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (F_i^B - F_i^A)^2}$$

Sistem temu balik citra yang dibentuk dengan kombinasi fitur tingkat rendah seringkali menggunakan bobot yang tetap atau sama untuk semua aspek. Namun, berdasarkan konten citra, ekstraksi informasi berisi berbagai aspek terlepas dari bobotnya. Dalam banyak sistem temu balik citra, pengguna harus secara manual menentukan relevansi karakteristik tingkat rendah. Kualitas kinerja ditentukan oleh bobot yang diberikan oleh pengguna. Namun, jika pengguna tidak berpengalaman, menentukan bobot yang tepat untuk atribut cukup sulit.

Berikut ini adalah algoritma temu balik citra berupa pengukuran *similarity* antara citra kueri dengan citra dalam database.

```
1. Memperoleh vektor fitur gabungan untuk moment warna, tekstur, bentuk dan ged citra kueri.  
   Cari Fitur ColorMoment(kueri)  
   Cari Fitur GLCM(kueri)  
   Cari Fitur HuMoment(kueri)  
   Cari Fitur GED (kueri)
```

2. Ulangi langkah 1 untuk seluruh citra dalam database untuk memperoleh fitur semua citra dalam database.
3. Hitung matriks similarity menggunakan euclidean distance antara citra kueri dengan semua citra yang ada di database.
Hitung dan normalisasi similarity ColorMoment (fiturCM, databaseFitur)
Hitung dan normalisasi similarity GLCM (fiturGLCM, databaseFitur)
Hitung dan normalisasi similarity HuMoment (fiturHuMoment, databaseFitur)
Hitung dan normalisasi similarity GED (fitur Graf, databaseGraf)
4. Berikan nilai bobot (A,B,C,D) untuk Color Moment, GLCM, huMoment dan GED
5. Fitur moment warna, fitur tekstur, fitur bentuk dan fitur GED digabungkan menjadi satu vektor untuk pengukuran kesamaan.

$$\text{similarity_total} = A * \text{similarity_colorMoment} + B * \text{similarity_glcm} + C * \text{similarity_huMoment} + D * \text{hslCmpGED}$$
6. Ambil citra berdasarkan indeks similarity.

4.2 Segmentasi citra dan *Region Adjacency Graph*

Segmentasi citra adalah proses membagi citra digital menjadi beberapa segmen yang koheren secara spasial. Segmentasi citra menghasilkan sekumpulan daerah homogen dari suatu citra sedemikian rupa sehingga semua piksel suatu daerah yang diinginkan menjadi terhubung. Setiap segmen sesuai dengan sekelompok piksel dan segmen tersebut saling eksklusif. Dengan kata lain, setiap piksel akan ditempatkan tepat pada satu segmen. Tujuan segmentasi adalah mengelompokkan piksel sedemikian rupa sehingga sesuai dengan struktur yang relevan secara visual (Suhasini dkk., 2008). Segmentasi citra pada umumnya berdasar pada sifat *discontinuity* atau *similarity* dari intensitas piksel Pendekatan *discontinuity* dilakukan dengan mempatisi citra bila terdapat perubahan intensitas secara tiba-tiba (*edge based*). Pendekatan *similarity* dilakukan dengan mempatisi citra menjadi daerah-daerah yang memiliki kesamaan sifat tertentu (*region based*), contohnya adalah *thresholding*, *region growing*, *region splitting* dan *merging*

Integrasi semua wilayah ini merupakan gambaran keseluruhan citra. Setiap wilayah memiliki satu set piksel dan setiap piksel dicirikan oleh posisi dan vektor fiturnya. Semua piksel suatu wilayah serupa berhubungan dengan serangkaian fitur (Camilus & Govindan, 2012). Piksel yang mirip akan dikelompokkan bersama.

Berdasarkan *region* yang didapatkan melalui segmentasi maka dibentuk suatu graf dengan satu *region* diwakili dengan satu simpul yang diambil dari *centroid region* tersebut dan relasi ketetanggaan antar *region* dinotasikan dengan suatu sisi. Model representasi ini disebut dengan *Region Adjacency Graph* (RAG). Dengan menggunakan *Region Adjacency Graph* jumlah simpul yang bisa dihasilkan akan

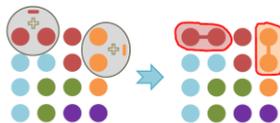
jauh berkurang karena ada reduksi dari jumlah piksel dalam satu *region*. (Trémeau & Colantoni, 2000)

Contoh : Tahap segmentasi

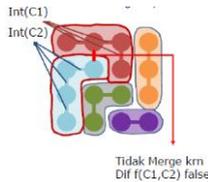
Langkah 1 :



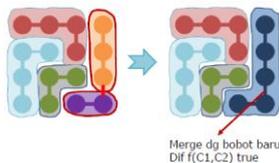
Langkah 2 :



Kasus tidak terjadi merging :



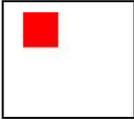
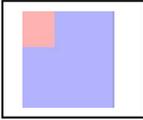
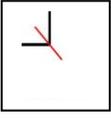
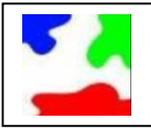
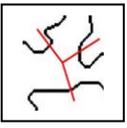
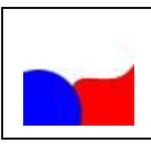
Kasus terjadi merging :



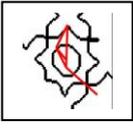
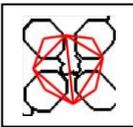
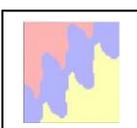
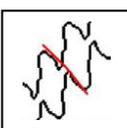
Gambar 2 Tahap proses segmentasi citra dan pengabungan region

Dalam penelitian ini, database citra dibagi atas 4 jenis dataset yaitu artificial, batik, COIL-100 dan WANG. Setiap citra disegmentasi menjadi *region-region* yang representasinya menggunakan *Region Adjacency Graph* (RAG). Banyaknya simpul dari setiap graf diatur dalam rentang 2 s.d. 15 simpul. Tujuannya untuk mempersingkat waktu pemrosesan. Tabel III.1, III.2, III.3 dan III.4 memperlihatkan contoh beberapa hasil dari proses segmentasi dan RAG dari setiap jenis dataset.

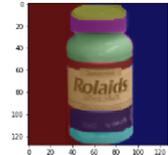
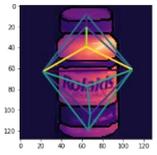
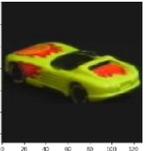
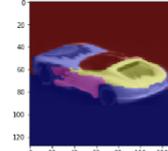
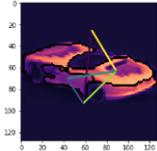
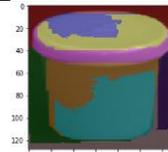
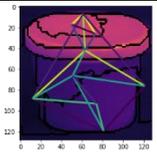
Tabel 1. Contoh citra Segmentation dan Hasil RAG citra artificial

Original Image	Image Segmentation	RAG
		
		
		

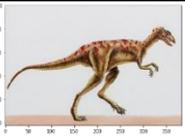
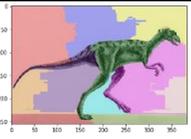
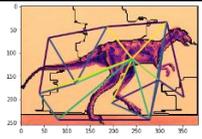
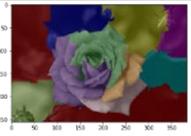
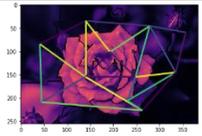
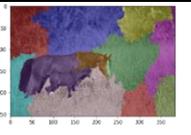
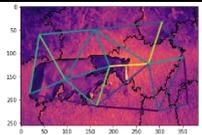
Tabel 2. Contoh citra Segmentation dan Hasil RAG Citra Batik

Original Image	Image Segmentation	RAG
		
		
		

Tabel 3. Contoh citra Segmentation and Hasil RAG Citra COIL-100

Original Image	Image Segmentation	RAG
		
		
		

Tabel 4. Contoh citra Segmentation dan Hasil RAG Citra WANG

Original Image	Image Segmentation	RAG
		
		
		

Tahap dalam ekstraksi fitur graf yaitu :

1. Tahap *preprocessing* citra.
2. Tahap *preprocessing* algoritma , menyediakan struktur data yang dibutuhkan oleh metoda segmentasi tertentu.
3. Tahap segmentasi yaitu melakukan transformasi struktur data menjadi peta label yang menunjukkan piksel-piksel yang berafiliasi dengan *region*
4. Tahap ekstraksi graf, berdasarkan peta label diekstrak struktur graf. Pertama dengan menghitung centroid *region*. Selain itu vektor fitur akan disimpan untuk setiap *region* yang meliputi informasi tentang rata-rata warna, *gradient* atau *histogram environment*.

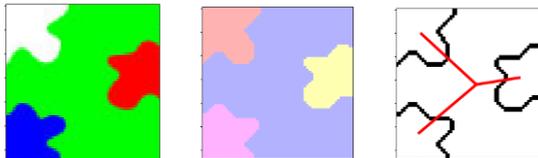
Fitur-fitur yang dihasilkan dari setiap ekstraksi fitur graf dengan melalui tahap segmentasi dan pembuatan graf RAG adalah:

1. *Nodes*, simpul-simpul yang terbentuk
2. *Area atau Luas region*, total piksel RGB dari masing-masing *region*
3. *Centroid*, nilai titik tengah dari masing-masing *region*
4. *Mean Color*, nilai rata-rata piksel dalam RGB dari masing-masing *region*
5. *Edges*, sisi-sisi yang terbentuk dari setiap pasangan simpul
6. *Weight*, nilai *euclidian distance* dari masing-masing *edge*

Graph Matching adalah proses mengevaluasi kesamaan antara dua graf dengan membandingkannya untuk menemukan korespondensi yang bersesuaian antara simpul-simpul dan sisi-sisinya. Konsep-konsep yang standar yang menjadi dasar dari *Graph Matching* adalah : Graf *isomorfisme*, subgraf *isomorfisme*, *Maximum Common Subgraph* , dan *Graph Edit Distance*. Ada dua jenis *Graph Matching* yang utama yaitu *exact matching* dan *inexact matching* (Conte dkk., 2007).

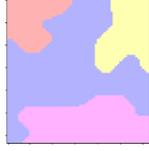
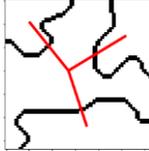
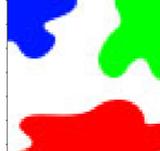
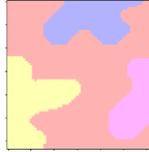
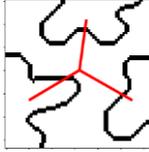
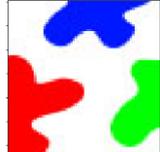
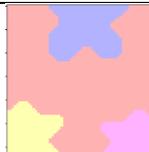
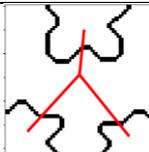
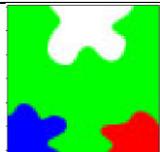
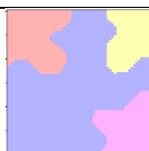
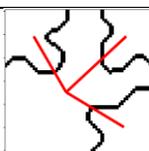
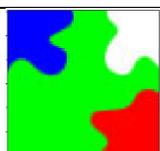
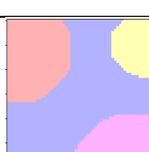
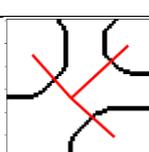
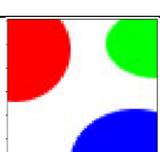
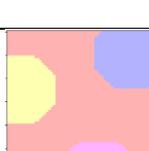
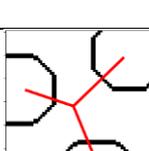
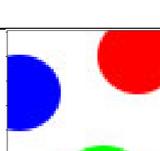
Pengujian VF2 dengan menggunakan data citra artificial

Data Uji Citra Artificial : Img134.jpg



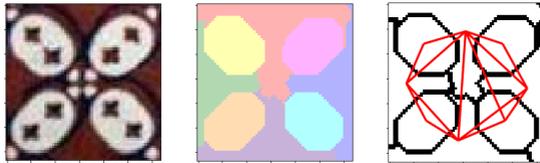
Gambar 3 Data uji citra artificial untuk pengujian dengan VF2

Tabel 5. Beberapa hasil pengujian VF2 pengenalan citra artificial berdasarkan data uji Img34.jpg

Citra Segmentasi	RAG	Citra Asal
		
		
		
		
		
		

contoh dari pengujian pada citra real dengan menggunakan GED yang dalam hal ini setiap operasi insert, delete dan substitusi diberi nilai cost

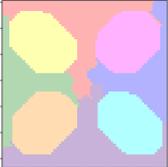
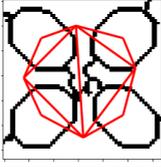
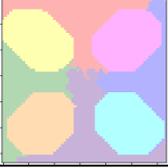
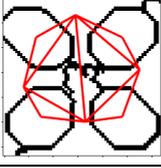
Data Uji Citra Real : Batik070.jpg



Gambar 4. Data uji citra real untuk pengujian dengan *Graph Edit Distance*

Tabel 6. Beberapa hasil pengujian GED pengenalan citra real berdasarkan data uji Batik070.jpg dengan nilai Cost ≤ 7

Citra Segmentasi	RAG	Citra Asal	Cost GED
			0
			7 (substitusi)
			4 (insert, delete, substitusi)
			6 (insert, delete, substitusi)

Citra Segmentasi	RAG	Citra Asal	Cost GED
			2 (delete, substitusi)
			2 (delete, substitusi)

4.3 Pembobotan Otomatis Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan

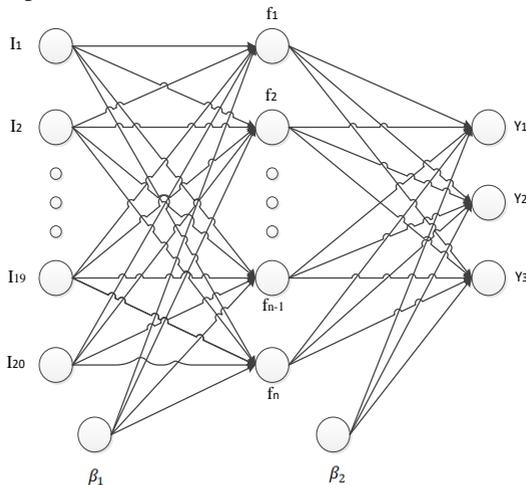
Bobot $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ adalah bobot untuk fitur non graf yang dapat diperoleh secara otomatis selain dapat juga diberikan secara manual. Bobot ω_1 digunakan untuk momen warna, bobot ω_2 untuk Hu Moment, dan bobot ω_3 untuk GLCM yang pencarian nilai otomatisnya menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dengan metoda *Multi Layer Perceptron* (MLP). JST merupakan sistem pemrosesan informasi yang memiliki karakteristik mirip dengan jaringan syaraf biologis. JST dibentuk sebagai generalisasi dari model matematis jaringan syaraf biologis, dengan asumsi bahwa: pemrosesan informasi terjadi di banyak elemen sederhana (*neuron*). Sinyal dikirim antar *neuron* melalui *function*. Penghubung antar neuron memiliki bobot yang akan memperkuat atau memperlemah sinyal. Untuk menentukan output, setiap *neuron* menggunakan fungsi aktivasi (biasanya bukan fungsi linier) yang ditetapkan ke jumlah input yang diterima. Besarnya keluaran ini kemudian dibandingkan dengan suatu ambang batas (*threshold*). Detail desain model seperti terlihat pada Tabel III.9.

Tabel 7 Desain model JST multi layer perceptron

Parameter	Kuantitas	Informasi
<i>Input Layer</i>	20 neuron	9 <i>Color Moments</i> 7 <i>Hu moment</i> 4 GLCM
<i>Hidden Layer</i>	Trial and error	8-13
<i>Output Layer</i>	3 neuron	Bobot dari warna, bentuk dan tekstur
<i>Initial weight</i>	Trial and error	Bilangan Random
<i>Learning Rate</i>	Trial and error	0.1 - 0.3

<i>epoch</i>	Trial and error	500 - 2000
<i>Activation Function</i>	1	logsig

Layer input menerima 20 fitur, yang meliputi 9 fitur warna, 7 fitur *Hu Moment*, dan 4 fitur GLCM. Layer tersembunyi diperoleh dari proses trial and error dengan jumlah neuron yang diuji antara 8 sampai 13 neuron, sedangkan ada tiga layer output yang akan menjadi nilai bobot $\omega_1, \omega_2, \omega_3$. Dari Tabel 7 dapat digambarkan arsitektur Model JST seperti pada Gambar 5:



Gambar 5 Arsitektur Model JST

Nilai Target Terbaik *Precision* adalah nilai yang diperoleh melalui pemilihan terbaik dari 67 parameter bobot alternatif $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ yang diberikan secara manual. Bobot $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ yang dipilih merupakan gabungan nilai pecahan yang berjumlah 100%, yaitu pasangan (0,0,1), (0,0.1,0.9), (0,0.2,0.8), (0,0.3), 0.7), ..., (0,8,0,0,2), (0,8,0,1,0,1), (0,8,0.2,0), (0,9,0,0,1), (0,9,0,1,0), (1,0, 0). Untuk parameter MLP dipilih nilai hidden layer size = 11 dan learning rate = 0.1 yang memberikan nilai *Precision* terbaik. Adapun untuk algoritma untuk temu balik citra dengan pembobotan otomatis bisa dilihat pada gambar III.16

```

1. Obtain composite feature vectors for moment color, texture, and shape image query.
   Look for ColorMomentFeature
   Look for HuMomentFeature
   Look for GLCMFeature

2. Repeat step 1 for all images to obtain features in the database.

```

Calculate the similarity matrix using the Euclidean distance.
 Calculate and normalize Color Moment similarity
 Calculate and normalize HuMoment similarity
 Calculate and normalize GLCM similarity

3. Use ANN to get weight values (ω_1 , ω_2 , ω_3) for the Color Moment, hu Moment, and GLCM features

```
clf = MLPClassifier(hidden_layer_sizes=11,
                    learning_rate_init=0.1, max_iter=2000)
clf.fit(x_train, y_train)
```

4. Color moment, Hu Moment, and GLCM features are combined into a single vector for similarity measurements.

$$\text{Similarity_total} \leftarrow \omega_1 * \text{similarity_moment} + \omega_2 * \text{similarity_hu Moment} + \omega_3 * \text{similarity_glcm}$$

5. Take the image based on the similarity index.

4.4. Evaluasi Hasil

Berdasarkan tabel-tabel *Precision* yang didapatkan untuk semua jenis data set maka didapatkan nilai *Precision* dari setiap jenis data sebagai berikut:

Tabel 8. *Precision* (%) dari metoda berbasis graf, non graf dan kombinasi graf dengan non graf dan otomatis

Data set	Oto matis (Non graf)	Graf	Kombinasi Manual (Non Graf) + Graf							Rata rata manual (non graf) + graf	Oto matis (non graf) + graf
			CM + graf	Glc m+ graf	HM + graf	CM + glcm + graf	CM+ HM + graf	Glc m + HM + graf	CM + glcm + HM + graf		
Artificial	94.3	98.2	97.3	98.8	97.9	98.9	97.9	98.9	98.5	98.3	97.0
Batik	99.0	82.1	95.1	88.8	92.1	94.9	97.0	94.6	96.9	94.2	99.0
COIL-100	92.4	59.0	94.5	80.1	68.8	87.5	89.1	80.5	88.6	84.1	78.9
Wang	64.9	32.0	69.2	58.8	60.1	68.3	60.1	53.2	65.2	62.1	68.4
Rata-rata	87.7	67.8	89.0	81.6	79.7	87.4	86.0	81.8	87.3	84.7	85.8

Tabel 9 Selisih *Precision* antara bobot otomatis dengan manual

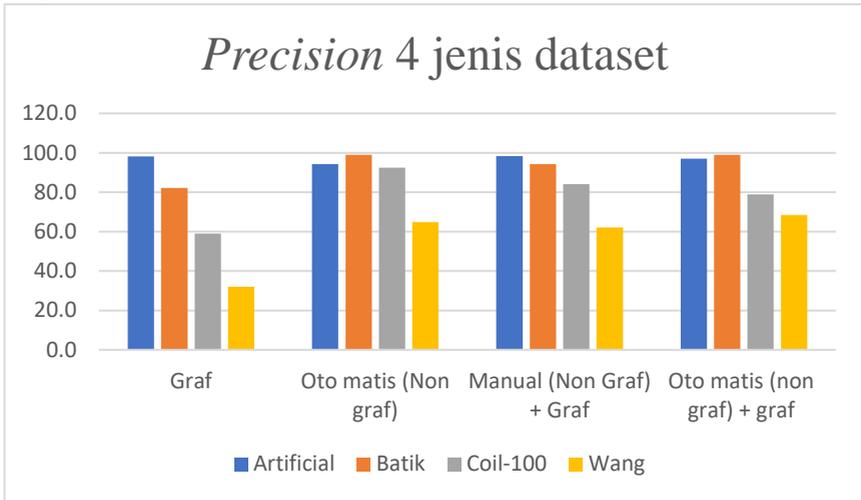
Data set	Selisih Otomatis dengan		
	Graf	Non graf	Manual Non Graf + Graf
Artificial	-1.2	2.7	-1.3
Batik	16.9	0.0	4.8
COIL-100	19.9	-13.5	-5.2
Wang	36.4	3.5	6.3

Berdasarkan Tabel 8 dan Tabel 9 dapat dilihat bahwa :

1. Kombinasi metoda berbasis graf dengan non graf baik dengan pembobotan manual ataupun pembobotan otomatis akan meningkatkan *Precision* dibandingkan dengan metoda berbasis graf pada data set batik, COIL 100 dan Wang, kecuali pada data set artificial. Rata-rata *Precision* untuk 4 data set dengan metoda graf adalah 67.8 %. Nilai *Precision* ini sebanding dengan nilai *Precision* pendekatan Sharma, yang berkisar antara 35 % dan 67% (Sharma et al., 2012), dan Ashnil Kumar, yaitu 52,43 % (Kumar et al., 2013). Nilai *Precision* akan meningkat dalam rentang 79.7 % sampai 89.0% dengan menggunakan kombinasi metoda berbasis graf dan non graf.
2. *Precision* dari model otomatis dengan non graf lebih tinggi pada data set artificial, batik dan Wang. Namun pada data set COIL-100 memiliki nilai lebih rendah.
3. Jika dibandingkan dengan Kombinasi Metoda berbasis non graf manual + graf maka nilai *Precision* Kombinasi Metoda berbasis non graf otomatis + graf lebih tinggi pada data set Batik dan Wang, tetapi lebih rendah pada data set artificial dan COIL-100.
4. Walaupun pada data set artificial *Precision* nya lebih kecil tetapi ketepatan dari citra yang diambil menjadi lebih baik dengan menggunakan kombinasi metoda berbasis graf dan non graf.
5. Pembobotan otomatis akan mencari kemungkinan fitur yang lebih tepat terhadap prosentase dari nilai fitur warna, tekstur atau bentuk. Hasil *Precision* berbeda akan didapatkan dengan menggunakan nilai parameter yang berbeda pula baik secara manual ataupun otomatis, tergantung dari jenis citra dan penekanan prioritas temu balik , apakah berdasarkan warna, bentuk atau tekstur
6. Pembuatan RAG sangat dipengaruhi oleh hasil segmentasi dan hal ini akan menentukan proses temu balik . Over segmentasi mempengaruhi banyak

simpul yang dibuat dalam RAG, akibatnya proses matching menjadi tidak tepat atau memberikan nilai *edit cost* yang besar .

Gambar 6 merupakan grafik dari *Precision* dari 4 jenis data set berdasarkan data dari Tabel 9



Gambar 6. Grafik *Precision* 4 jenis data set

Untuk data artificial, kombinasi graf dengan non graf tidak begitu berpengaruh secara significant terhadap nilai *Precision*, tetapi walaupun demikian ketepatan urutan hasil temu balik citra menjadi sangat baik. Begitu juga dengan data batik. Sementara untuk data COIL-100, pada beberapa jenis citra terjadi over segmentasi, sehingga RAG yang dibentuk menjadi sangat beragam. Akibatnya nilai *Edit cost* dari GED menjadi besar sehingga nilai *Precision* menjadi kecil. Hal ini terjadi juga pada data Wang, yang memiliki variasi graf yang sangat banyak. Semua ini menunjukkan bahwa bentuk RAG yang tidak terlalu bervariasi akan memberikan nilai *Precision* yang tinggi baik terhadap metoda yang berbasis graf apalagi jika ditambahkan dengan pengkombinasian metoda berbasis graf dengan metoda non graf.

Selain dengan melihat nilai *Precision* pada $n=10$ juga akan diperlihatkan evaluasi performansi nilai *Precision*, *Recall* dan *F1_Score* berdasarkan nilai threshold tertentu. Hal ini dapat dilihat pada tabel-tabel berikut:

Tabel .10 Evaluasi performansi data artificial (%) yang memberikan hasil terbaik

No	Metoda	Precision	Recall	FI_Score
1	CM + GED (Threshold = 0.3)	86.78	83.94	85.34
2	GLCM+ GED (Threshold = 0.3)	88.88	81.90	85.25
3	HM + GED (Threshold = 0.15)	95.22	82.56	88.44
4	CM + GLCM + GED (Threshold = 0.3)	98.59	86.30	92.04
5	CM + HM + GED (Threshold = 0.3)	91.70	86.59	89.07
6	GLCM + HM + GED (Threshold = 0.15)	100.00	74.36	85.29
7	CM + GLCM + HM + GED (Threshold = 0.3)	97.09	88.27	92.47

CM=Color Moment, GLCM=Grey Level Co-occurrence Matrix, HM=Hu Moment,

Tabel 11. Evaluasi performansi dataset Batik (%) yang memberikan hasil terbaik

No	Metoda	Precision	Recall	FI_Score
1	CM + GED (Threshold = 0.5)	88.14	67.31	76.33
2	GLCM + GED (Threshold = 0.5)	78.78	60.07	68.17
3	HM + GED (Threshold = 0.6)	84.90	74.63	79.44
4	CM + GLCM + GED (Threshold = 0.6)	83.09	66.11	73.63
5	CM + HM + GED (Threshold = 0.6)	86.25	60.69	71.25

No	Metoda	Precision	Recall	F1_Score
6	GLCM + HM + GED (Threshold = 0.6)	82.46	82.41	82.43
7	CM + GLCM + HM + GED (Threshold = 0.6)	87.22	68.45	76.70

CM=Color Moment, GLCM=Grey Level Co-occurrence Matrix, HM=Hu Moment,

Tabel 12 Evaluasi performansi dataset COIL-100 (%) yang memberikan hasil terbaik

No	Metoda	Precision	Recall	F1_Score
1	CM + GED (Threshold = 0.3)	90.26	53.99	67.57
2	GLCM + GED (Threshold = 0.3)	63.89	45.91	53.43
3	HM + GED (Threshold = 0.3)	46.85	49.16	47.98
4	CM + GLCM + GED (Threshold = 0.3)	88.00	34.62	49.69
5	CM + HM + GED (Threshold = 0.3)	88.01	32.19	47.14
6	GLCM + HM + GED Threshold = 0.30	62.18	51.54	56.36
7	CM + GLCM + HM + GED (Threshold = 0.30)	78.34	49.90	60.97

CM=Color Moment, GLCM=Grey Level Co-occurrence Matrix, HM=Hu Moment

Tabel 13. Evaluasi performansi dataset Wang (%) yang memberikan hasil terbaik

No.	Metoda	Precision	Recall	F1_Score
1	CM + GED (Threshold = 0.5)	52.61	66.28	58.66

No.	Metoda	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>F1_Score</i>
2	GLCM + GED (Threshold = 0.5)	43.47	62.42	51.25
3	HM + GED (Threshold = 0.4)	19.75	76.98	31.43
4	CM + GLCM + GED (Threshold = 0.5	61.64	40.52	48.90
5	CM + HM + GED (Threshold = 0.5)	46.72	52.20	49.31
6	GLCM + HM + GED (Threshold = 0.4)	42.95	41.04	41.97
7	CM + GLCM + HM + GED (Threshold = 0.5)	50.18	55.92	52.90

CM=Color Moment, GLCM=Grey Level Co-occurrence Matrix, HM=Hu Moment,

5. Kesimpulan dan Kontribusi Ilmiah

Tahap-tahap dalam analisis citra meliputi segmentasi citra dan ekstraksi graf dari citra yang disegmentasi. Representasi graf yang digunakan adalah *Region Adjacency Graph*. Telah dilakukan akuisisi citra serta pemilihan dataset dan melakukan proses enhancement. Telah dilakukan segmentasi dengan model super piksel dengan metoda Minimum Spanning Tree dan didapatkan citra-citra yang tersegmentasi yang akan diekstraksi *region-region* dari citra tersebut dengan bentuk representasinya adalah *Region Adjacency Graph* (RAG) dan didapatkan fitur-fitur graf seperti simpul dan sisi graf yang terbentuk, area *Luas region*, *Centroid* yang menjadi nilai titik tengah dari masing-masing *region*, *Mean Color* sebagai nilai rata-rata piksel dalam RGB dari masing-masing *region*, dan *weight* yang merupakan nilai *euclidian distance* dari masing-masing sisi graf. Pemilihan teknik yang tepat untuk mendapatkan *Region Adjacency Graph* (RAG) dari hasil segmentasi merupakan tahap yang penting dan menentukan untuk dilakukannya ekstraksi graf dari citra.

Graph Matching yang dilakukan menggunakan teknik *inexact Graph Matching* dengan algoritma *Graph Edit Distance* (GED). Algoritma *inexact Graph Matching* tidak mencari korespondensi yang persis sama antara dua graf tetapi mencari kemiripan dari dua graf yang dibandingkan. Dalam hal ini, *cost* (atau jarak) dihitung dengan menghitung perbedaan perhitungan di antara atribut yang sesuai. Pencocokan akan mencari pemetaan yang meminimalkan *cost* tersebut.

Tahap-tahap dalam melakukan pemodelan temu balik citra yang dikembangkan berdasarkan suatu *framework*. Metoda yang diterapkan dalam hal ini untuk mencari fitur visual citra adalah metoda *Color Moments* untuk fitur warna, *Hu Moment* untuk fitur bentuk dan *Gray Level Co-occurrence Matrix* (GLCM) untuk fitur tekstur. Sementara itu untuk proses *inexact Graph Matching* menggunakan *Graph Edit Distance* (GED) untuk memeriksa kesamaan antara dua buah graf citra yang representasinya berbentuk *Region Adjacency Graph* (RAG). Dataset yang digunakan adalah dataset artificial, batik, COIL-100 dan Wang. Pembuatan RAG sangat dipengaruhi oleh hasil segmentasi dan akan mempengaruhi hasil dari proses temu balik citra. Over segmentasi menjadikan banyak simpul yang dibuat dalam RAG, akibatnya proses matching menjadi tidak tepat atau memberikan nilai *edit cost* yang besar. RAG yang tidak terlalu bervariasi akan memberikan nilai *Precision* yang tinggi, terutama terhadap metoda yang berbasis graf apalagi jika ditambahkan dengan pengkombinasian antara metoda berbasis graf dengan metoda non graf.

Telah berhasil dikembangkan suatu model pencocokan citra dan menerapkannya pada temu balik citra dengan mengkombinasikan metoda *inexact Graph Matching* dengan fitur visual citra dengan menggunakan metode jaringan saraf tiruan *multi-layer perceptron* untuk mendapatkan bobot fitur visual secara otomatis dan sekaligus mencari bobot optimalnya. Input layer menerima 20 fitur, yang meliputi 9 fitur warna, 7 fitur momen hu, dan 4 fitur GLCM. *Hidden layer* diperoleh dari proses *trial*

and error dengan jumlah *neuron* yang diuji antara 8 sampai 13 *neuron*, sedangkan lapisan keluaran ada tiga yang akan menjadi nilai bobot untuk fitur warna, fitur bentuk dan fitur tekstur. Kombinasi dari metoda *inexact Graph Matching* dengan fitur visual citra dilakukan dengan memberikan bobot fitur kombinasi bobot 50% untuk fitur visual yang bisa dilakukan secara manual atau otomatis dan 50% bobot untuk fitur graf dengan *inexact Graph Matching*

6. Tindak Lanjut

Untuk meningkatkan kinerja dari proses pencocokan citra maka bisa dipilih metoda-metoda pencarian fitur yang lain yang digabungkan dengan metoda *Graph Matching*. Pemrosesan menggunakan teknik parallel akan diperlukan untuk mempercepat proses komputasi pengolahan graf. Penggunaan *Graph Machine Learning* adalah teknik yang sangat disarankan untuk pengolahan citra dengan menggunakan pendekatan graf pada masa yang akan datang.

Riwayat Hidup

Biodata

Nama lengkap : Akmal
Tempat dan tanggal lahir : Pariaman, 15 Juni 1970
Jenis kelamin : Laki-laki
Pekerjaan dan instansi : Dosen Ilmu Komputer Universitas Padjadjaran
Alamat kantor : Jl. Soekarno, Jatinangor km 21 Bandung-Sumedang
Kabupaten Sumedang
Kode Pos : 45363
Telp./Fax. : 022 7798983
E-mail : informatika@unpad.ac.id
Alamat rumah : Jl. Giri Mekar Indah II no 21 Kompleks Giri Mekar Permai, Cilengkrang Bandung
Kode Pos : 40619
E-mail : akmal@unpad.ac.id
HP : 08122461048

Riwayat Pendidikan

- Doktor (Dr.) Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, 2023
- Magister Informatika (MT), Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, 1998
- Sarjana Matematika (S.Si), FMIPA, Universitas Padjadjaran, 1994

Daftar publikasi penelitian disertasi :

No	Judul Makalah	Status	Publikasi
1.	Graph Extraction of Batik Image Using Region Adjacency Graph Representation	Withdraw	International Conference on Electrical Engineering & Computer Science (ICEECS) 2018. 2018, November 13-14 in Discovery Kartika Plaza Hotel, South Kuta, Bali, Indonesia
2.	Image Graph Matching Based on Region Adjacency Graph	Publish	The 2019 5th International Conference on Science in Information Technology (ICSITech). October 23-24, 2019, at Grand Inna Malioboro, Yogyakarta,

No	Judul Makalah	Status	Publikasi
			Indonesia
3.	Graph Extraction of Batik Image Using Region Adjacency Graph Representation	Publish	the 5 th International Conference on Information Technology and Digital Applications (ICITDA) 2020, virtually on November 13-14, 2020
4.	Image Retrieval Based on Fusion of Graph Method with Color Moments, GLCM and Hu Moments	Publish	International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology (IJASEIT) Insight. Vol. 13 (2023) No. 3. (Scimago JR- Q3)
5.	Automatic Weight of Color, Texture, and Shape Features in Content-Based Image Retrieval Using Artificial Neural Network	Accepted	International Journal on Informatics Visualization (JOIV) Vol 7, No 3 (2023) (Scimago JR- Q4)

Ucapan Terimakasih

Dalam penyelesaian disertasi ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, Untuk itu penulis menyampaikan ucapan terimakasih setulusnya kepada:

1. Prof. Dr. Ing. Ir. Iping Supriana, DEA. (Alm) sebagai promotor sebelumnya atas segala nasehat, bimbingan, pencerahan, dan dukungan yang sangat berharga, serta tak henti-hentinya menularkan kekuatan dalam mencipta karya ini.
2. Dr. Ir. Rinaldi Munir, MT. sebagai promotor atas segala nasehat, bimbingan, pencerahan, dan dukungan yang sangat berharga, serta tak henti-hentinya menularkan kekuatan dalam mencipta karya ini.
3. Dr. Judhi Santoso, MSc. sebagai ko-promotor atas segala nasehat, bimbingan, dan dukungan yang sangat berharga.
4. Dr. Tutun Juhana, ST,MT sebagai Dekan Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung.
5. Dr. Umar Khayam, ST., MT. sebagai Ketua Program Studi Doktor Teknik Elektro dan Informatika Institut Teknologi Bandung.
6. Bapak Prof. Ir. Dwi Hendratmo W, M.Sc, Ph.D.(alm) atas masukan dan perbaikan yang diberikan dalam ujian Ujian Kualifikasi, Tahap Proposal, Seminar Kemajuan I, Seminar Kemajuan II dan Seminar Kemajuan III.
7. Ibu Prof. Dr. Tati Latifah E.R. Mengko, Bapak Ir. Rila Mandala, M.Eng., Ph.D, dan Bapak Nugraha Priya Utama, ST, M.A., Ph.D., yang telah

memberikan masukan dan saran dalam Seminar Kemajuan IV pada penulisan disertasi ini.

8. Bapak Prof. Andriyan Bayu Suksmono, M.T., Ph.D, yang telah memberikan masukan dan saran dalam penulisan disertasi ini.
9. Ibu Dr. Nur Ulfa Maulidevi, S.T., M.Sc., yang telah memberikan masukan dan saran dalam penulisan disertasi ini.
10. Bapak Agus Pratondo, Ph.D, yang telah memberikan masukan dan saran dalam penulisan disertasi ini.
11. Teman-teman mahasiswa S-3 STEI Angkatan 2016 dan Laboratorium Residensi Doktorat Sekolah Teknik Elektro dan Informatika Institut Teknologi Bandung.
12. Rekan-rekan dosen di departemen Ilmu Komputer, FMIPA, Universitas Padjadjaran
13. Direktorat Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan atas bantuan Beasiswa Unggulan Dosen Indonesia Dalam Negeri (BUDI-DN)
14. Seluruh pihak yang telah bekerja sama dan terlibat dalam penelitian ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.