

**ALGORITMA *GREEDY GRAPH COLORING* UNTUK
MENYELESAIKAN PERMAINAN SUDOKU**

Skripsi



oleh

ARMA HENDRIANTA

71110081

PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI
UNIVERSITAS KRISTEN DUTA WACANA

2017

ALGORITMA *GREEDY GRAPH COLORING* UNTUK MENYELESAIKAN PERMAINAN SUDOKU

Skripsi



Diajukan kepada Program Studi Teknik Informatika Fakultas Teknologi Informasi

Universitas Kristen Duta Wacana

Sebagai Salah Satu Syarat dalam Memperoleh Gelar

Sarjana Komputer

Diajukan oleh :

Arma Hendrianta

71110081

PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INFORMASI
UNIVERSITAS KRISTEN DUTA WACANA
YOGYAKARTA

2017

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

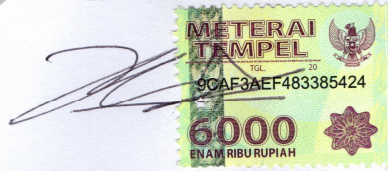
Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

ALGORITMA GREEDY GRAPH COLORING UNTUK MENYELESAIKAN PERMAINAN SUDOKU

yang saya kerjakan untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Komputer pada pendidikan Sarjana Program Studi Teknik Informatika Fakultas Teknologi Informasi Universitas Kristen Duta Wacana, bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi kesarjanaan di lingkungan Universitas Kristen Duta Wacana maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Jika dikemudian hari didapati bahwa hasil skripsi ini adalah hasil plagiasi atau tiruan dari skripsi lain, saya bersedia dikenai sanksi yakni pencabutan gelar kesarjanaan saya.

Yogyakarta, 1 Maret 2017



ARMA HENDRIANTA

71110081

HALAMAN PERSETUJUAN

Judul Skripsi : ALGORITMA GREEDY GRAPH COLORING
UNTUK MENYELESAIKAN PERMAINAN
SUDOKU

Nama Mahasiswa : ARMA HENDRIANTA

N I M : 71110081

Matakuliah : Skripsi (Tugas Akhir)

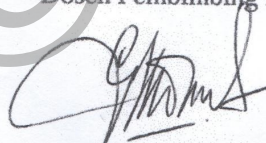
Kode : TIW276

Semester : Genap

Tahun Akademik : 2016/2017

Telah diperiksa dan disetujui di
Yogyakarta,
Pada tanggal 1 Maret 2017

Dosen Pembimbing I



R. Gunawan Santosa, Drs. M.Si.

Dosen Pembimbing II



Hendro Setiadi, M.Eng

HALAMAN PENGESAHAN

ALGORITMA GREEDY GRAPH COLORING UNTUK MENYELESAIKAN PERMAINAN SUDOKU

Oleh: ARMA HENDRIANTA / 71110081

Dipertahankan di depan Dewan Penguji Skripsi
Program Studi Teknik Informatika Fakultas Teknologi Informasi
Universitas Kristen Duta Wacana - Yogyakarta
Dan dinyatakan diterima untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Komputer
pada tanggal 16 Maret 2017

Yogyakarta, 30 Maret 2017
Mengesahkan,

Dewan Penguji:

1. R. Gunawan Santosa, Drs. M.Si.
2. Hendro Setiadi, M.Eng
3. Widi Hapsari, Dra. M.T.
4. Aditya Wikan Mahastama, S.Kom., M.Cs.



Dekan

(Budi Susanto, S.Kom., M.T.)

Ketua Program Studi

(Gloria Virginia, Ph.D.)

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya tugas akhir yang berjudul “Algoritma *Greedy Graph Coloring* Untuk Menyelesaikan Permainan Sudoku” dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyusun tugas akhir ini dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mencapai gelar sarjana strata satu (S1) pada Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi Universitas Kristen Duta Wacana Yogyakarta.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini, sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Pihak-pihak yang telah membantu tugas akhir ini yaitu :

1. Bapak Drs. R. Gunawan Santosa, M.Si., selaku dosen pembimbing I yang telah membimbing dan memberikan masukan-masukan dalam penyusunan tugas akhir ini.
2. Bapak Hendro Setiadi, ST. MM, MEngSc., selaku dosen pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan masukan-masukan guna menyelesaikan tugas akhir ini sebaik mungkin.
3. Seluruh dosen program studi Teknik Informatika yang telah mengajarkan banyak metode yang dapat diimplementasikan dalam pembuatan program, maupun penyusunan laporan dalam tugas akhir ini.
4. Kedua orang tua, Bapak Eka Supriyanta dan Ibu Irianti, serta keluarga yang telah memberikan dukungan moral, maupun material selama pengerjaan tugas akhir ini hingga selesai.
5. Teman-teman kost penulis, Adhi, Ismu, Rian yang selalu membantu dan mendukung dalam penulisan tugas akhir ini.

6. Teman-teman penulis, Hami, Krisna, dan Fendy, yang selalu menemani, membantu, dan mendukung.
7. Teman-teman di kampus yang membantu memberi solusi ketika menghadapi kendala saat pengerjaan tugas akhir ini.
8. Pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Terima Kasih.

©UKPDW

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat yang diberikan-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.

Laporan tugas akhir ini membahas tentang penelitian yang dilakukan penulis untuk mengetahui apakah algoritma *greedy graph coloring* sesuai untuk menyelesaikan permainan Sudoku 9×9 yang diterapkan pada Sudoku *solver*.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, tentunya masih terdapat banyak sekali kekurangan. Untuk itu, penulis sangat menghargai dan menerima jika ada berbagai masukan dari para pembaca, baik berupa kritik maupun saran yang sifatnya membangun demi penyempurnaan penulisan-penulisan tugas akhir di masa yang akan datang. Penulis meminta maaf yang setulus-tulusnya, apabila terdapat kesalahan dalam penulisan tugas akhir ini.

Yogyakarta, Februari 2017

Penulis

INTISARI

ALGORITMA *GREEDY GRAPH COLORING* UNTUK MENYELESAIKAN PERMAINAN SUDOKU

Sudoku merupakan sebuah *board game* yang sangat populer. Terdapat banyak jenis Sudoku, yang paling dikenal, yaitu *plain* Sudoku 9×9 . Aturan permainan ini sangat sederhana. Seorang pemain hanya perlu mengisi angka di antara 1 sampai 9 pada *cell-cell* yang kosong, dengan syarat tidak boleh ada angka yang sama dalam satu baris, kolom atau subgrid.

Dari aturan permainan tersebut, Sudoku dapat dilihat sebagai permasalahan pewarnaan graf. *Cell* merupakan verteks, angka 1 sampai 9 merupakan warna dan aturan penulisan angka sebagai verteks-verteks *adjacent*. Aturan permainan yang sederhana namun membutuhkan ketelitian ini membuat para penikmat *board game* sangat menyukainya. Karenanya, penulis merasa tertarik untuk melakukan penelitian tentang Sudoku dan pewarnaan graf.

Di dalam disiplin ilmu graf, terdapat banyak metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pewarnaan graf, salah satunya yaitu *greedy graph coloring*. Metode ini akan diimplementasikan pada sistem (*Sudoku Solver*) dengan sedikit perubahan. Dari hasil pengujian yang dilakukan penulis, pada tiga tingkat kesulitan soal Sudoku (mudah, menengah dan sulit), masing-masing 20 soal, tiap kategori dan total 60 soal, diperoleh hasil yang baik dengan rata-rata keseluruhan tingkat keberhasilan mencapai 95%. Kegagalan penyelesaian disebabkan oleh kurangnya angka (warna) yang digunakan dalam sistem.

Kata kunci : *Sudoku, Greedy Graph Coloring, Graph Theory, Algoritma Graf*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vi
KATA PENGANTAR	viii
INTISARI.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR GRAFIK.....	xviii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Sistem.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metodologi Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Tinjauan Pustaka.....	6
2.2 Landasan Teori.....	9
2.2.1 Sudoku <i>Puzzle</i>	9
2.2.2 Tingkat Kesulitan Sudoku	10
2.2.3 Sudoku <i>Solver</i>	10
2.2.3.1 Dasar Teori Graf	11
2.2.3.2 Algoritma pewarnaan Graf (<i>Graph Coloring Algorithm</i>)	12
2.2.3.3 Algoritma Pewarnaan Graf <i>Greedy (Greedy Graph Coloring Algorithm)</i>	13

2.2.3.4	Representasi Graf Dalam Bentuk Matriks	20
2.2.3.5	Contoh Penyelesaian Masalah Pewarnaan Graf Menggunakan Algoritma Pewarnaan Graf <i>Greedy</i>	21
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM		40
3.1	Peralatan yang Digunakan Dalam Penelitian	40
3.1.1	Spesifikasi Perangkat Keras (<i>Hardware</i>)	40
3.1.2	Spesifikasi Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	40
3.1.3	Spesifikasi Batasan Sistem	41
3.2	Gambaran Kerja Sistem	41
3.3	Perancangan Sistem	42
3.3.1	Diagram Alir (<i>Flowchart</i>) Algoritma <i>Greedy Graph Coloring</i> Yang Sudah Mengalami Modifikasi (Penambahan Fungsi Rekursif)	42
3.3.2	Diagram Alir (<i>Flowchart</i>) Keseluruhan Sistem	45
3.4	Perancangan Antarmuka Sistem	46
3.4.1	Rancangan Antarmuka Halaman Awal	46
3.4.2	Rancangan Antarmuka Halaman Tentang Penulis	47
3.4.3	Rancangan Antarmuka Halaman Utama	47
BAB 4 IMPLEMENTASI DAN ANALISIS SISTEM		49
4.1	Implementasi Sistem	49
4.1.1	Halaman Awal	49
4.1.2	Halaman Tentang Penulis	50
4.1.3	Halaman Utama Sudoku <i>Solver</i>	51
4.2	Validasi Sistem	57
4.2.1	Uji Validasi Sistem Tingkat Kesulitan Mudah (<i>Easy</i>)	57
4.2.2	Uji Validasi Sistem Tingkat Kesulitan Menengah (<i>Medium</i>)	62
4.2.3	Uji Validasi Sistem Tingkat Kesulitan Sulit (<i>Hard</i>)	67
4.3	Analisis Hasil Penelitian	73
4.3.1	<i>Analysis of Variance : Single Factor</i> (Anova : <i>Single Factor</i>)	73
4.3.1.1	Menghitung Nilai Statistik Pengujian (<i>F</i>)	74
4.3.1.2	<i>F Distribution</i>	79
4.3.2	Pengujian Anova : <i>Single Test</i>	80

4.3.3	Penarikan Kesimpulan Data Hasil Pengujian	82
4.3.3.1	Penarikan Kesimpulan Kegagalan Pengujian Sudoku <i>Solver</i>	82
4.3.3.2	Penarikan Kesimpulan Keberhasilan Pengujian Sudoku <i>Solver</i>	90
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		91
5.1	Kesimpulan	91
5.2	Saran	92
DAFTAR PUSTAKA		94
LAMPIRAN A		
LAMPIRAN B.....		
LAMPIRAN C.....		

©UKPDW

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penelitian Sudoku <i>solver</i> menggunakan algoritma-algoritma yang berbeda oleh beberapa peneliti.....	8
Tabel 2.2	Data hasil pengujian beberapa algoritma yang diterapkan pada Sudoku <i>solver</i> untuk menyelesaikan permainan Sudoku dan telah diurutkan dari tingkat kesulitan paling mudah ke paling sulit	18
Tabel 3.1	Fungsi Komponen Halaman Awal	46
Tabel 3.2	Fungsi Komponen Halaman Tentang Penulis	47
Tabel 3.3	Fungsi Komponen Halaman Utama.....	48
Tabel 4.1	Data hasil pengujian Sudoku dengan tingkat kesulitan mudah (<i>easy</i>).....	61
Tabel 4.2	Data hasil pengujian Sudoku dengan tingkat kesulitan mudah (<i>easy</i>).....	62
Tabel 4.3	Data hasil pengujian Sudoku dengan tingkat kesulitan menengah (<i>medium</i>).....	66
Tabel 4.4	Data hasil pengujian Sudoku dengan tingkat kesulitan menengah (<i>medium</i>).....	67
Tabel 4.5	Data hasil pengujian Sudoku dengan tingkat kesulitan sulit (<i>hard</i>)	71
Tabel 4.6	Data hasil pengujian Sudoku dengan tingkat kesulitan sulit (<i>hard</i>)	72
Tabel 4.7	Data perbandingan waktu yang dibutuhkan untuk penyelesaian soal Sudoku	75
Tabel 4.8	Tabel Kesimpulan.....	78
Tabel 4.9	Tabel Anova : <i>single factor</i>	78
Tabel 4.10	Tabel Anova : <i>single factor</i> hasil perhitungan data pengujian.....	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Cell-cell</i> Sudoku yang telah memiliki solusi dari angka awal (<i>clue</i>) yang terdapat pada Gambar 2.2	9
Gambar 2.2	Angka awal (<i>clue</i>) untuk <i>puzzle</i> Sudoku pada Gambar 2.1	9
Gambar 2.3	Gambaran sungai Pregel di Königsberg, Prusia Timur	11
Gambar 2.4	Representasi permasalahan sungai Pregel dalam bentuk graf..	12
Gambar 2.5	Graf G	13
Gambar 2.6	<i>Flowchart</i> Sudoku <i>solver</i> (algoritma <i>greedy graph coloring</i>)..	15
Gambar 2.7	<i>Flowchart</i> cekAdjacent untuk verteks dengan nilai yang sama	16
Gambar 2.8	Contoh dari Sudoku 4×4 , <i>cells</i> yang kosong diartikan sebagai variabel. B) Graf dari Sudoku 4×4 . C) <i>Puzzle</i> Sudoku dengan enumerasi kandidat yang telah diset	17
Gambar 2.9	Representasi sebuah graf dari sebuah <i>puzzle</i> Sudoku (4×4)	19
Gambar 2.10	Graf G	20
Gambar 2.11	Graf G_1	21
Gambar 2.12	Pewarnaan verteks v_3 pada Graf G_1 dengan warna order pertama, yaitu warna merah (M)	23
Gambar 2.13	Pewarnaan verteks v_4 pada Graf G_1 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	24
Gambar 2.14	Pewarnaan verteks v_1 pada Graf G_1 dengan warna order pertama, yaitu warna merah (M)	24
Gambar 2.15	Pewarnaan verteks v_2 pada Graf G_1 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	25
Gambar 2.16	Pewarnaan verteks v_5 pada Graf G_1 dengan warna order pertama, yaitu warna merah (M)	25
Gambar 2.17	Pewarnaan verteks v_6 pada Graf G_1 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	26
Gambar 2.18	Graf G_2	27
Gambar 2.19	Pewarnaan verteks v_1 pada Graf G_2 dengan warna order	

pertama, yaitu warna merah (M)	29
Gambar 2.20 Pewarnaan verteks v_2 pada Graf G_2 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	29
Gambar 2.21 Pewarnaan verteks v_3 pada Graf G_2 dengan warna order pertama, yaitu warna merah (M).....	30
Gambar 2.22 Pewarnaan verteks v_6 pada Graf G_2 dengan warna order ketiga, yaitu warna hijau (H)	30
Gambar 2.23 Pewarnaan verteks v_4 pada Graf G_2 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	31
Gambar 2.24 Pewarnaan verteks v_6 pada Graf G_1 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	31
Gambar 2.25 Representasi sebuah permainan Sudoku 9×9 ke dalam bentuk graf	32
Gambar 2.26 Pewarnaan verteks v_1 pada Graf G_2 dengan warna order pertama, yaitu warna merah (M).....	35
Gambar 2.27 Pewarnaan verteks v_2 pada Graf G_2 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	36
Gambar 2.28 Pewarnaan verteks v_3 pada Graf G_2 dengan warna order pertama, yaitu warna merah (M).....	36
Gambar 2.29 Pewarnaan verteks v_6 pada Graf G_2 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	37
Gambar 2.30 Pewarnaan verteks v_6 pada Graf G_2 dengan warna order pertama, yaitu warna merah (M).....	37
Gambar 2.31 Pewarnaan verteks v_4 pada Graf G_2 dengan warna order pertama, yaitu warna merah (M).....	38
Gambar 2.32` Pewarnaan verteks v_5 pada Graf G_2 dengan warna order kedua, yaitu warna cokelat (C)	38
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> algoritma <i>greedy graph coloring</i> yang sudah dimodifikasi	44
Gambar 3.2 Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> keseluruhan sistem	45
Gambar 3.3 Rancangan antarmuka Halaman Awal	46

Gambar 3.4	Rancangan antarmuka Halaman Tentang Penulis.....	47
Gambar 3.5	Rancangan antarmuka Halaman Utama	48
Gambar 4.1	Halaman Awal Sistem.....	49
Gambar 4.2	Halaman Tentang Penulis	50
Gambar 4.3	Tampilan antarmuka Sudoku <i>Solver</i>	51
Gambar 4.4	Sub menu Buka Soal	53
Gambar 4.5	Tampilan kotak dialog penyimpanan <i>file</i> soal atau solusi Sudoku yang akan dibuka.....	53
Gambar 4.6	Tampilan antarmuka sistem setelah salah satu soal Sudoku dibuka, kemudian tombol Simpan ditekan	54
Gambar 4.7	Tampilan kotak dialog penyimpanan <i>file</i> soal atau solusi Sudoku yang akan disimpan	54
Gambar 4.8	Tampilan Sudoku <i>Solver</i> , beserta waktu yang diperlukan untuk menyelesaikannya (detik) setelah tombol Solve ditekan	55
Gambar 4.9	<i>Cell-cell</i> Sudoku dalam keadaan kosong, setelah tombol Reset ditekan.....	55
Gambar 4.10	Antarmuka sistem untuk sub menu Tentang, untuk menampilkan informasi Tentang Penulis	56
Gambar 4.11	Tampilan Tentang Penulis	56
Gambar 4.12	Menunjukkan antarmuka sistem untuk sub menu Keluar	57
Gambar 4.13	Soal pengujian permainan Sudoku dengan tingkat kesulitan mudah (<i>easy</i>) dari situs web http://www.websudoku.com/	58
Gambar 4.14	Pengisian soal permainan Sudoku yang akan diuji ke dalam Sistem.....	58
Gambar 4.15	Hasil solusi soal Sudoku menggunakan Sudoku <i>solver</i> , beserta catatan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikannya dalam satuan detik	59
Gambar 4.16	Solusi Sudoku dimasukkan ke permainan Sudoku di situs web http://www.websudoku.com/	60
Gambar 4.17	Halaman web baru yang muncul, jika solusi Sudoku sudah	

	benar	60
Gambar 4.18	Soal pengujian permainan Sudoku dengan tingkat kesulitan menengah (<i>medium</i>) dari situs web http://www.websudoku.com/	63
Gambar 4.19	Pengisian soal permainan Sudoku yang akan diuji ke dalam Sistem	63
Gambar 4.20	Hasil solusi soal Sudoku menggunakan Sudoku <i>solver</i> , beserta catatan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikannya dalam satuan detik	64
Gambar 4.21	Solusi Sudoku dimasukkan ke permainan Sudoku di situs web http://www.websudoku.com/	65
Gambar 4.22	Halaman web baru yang muncul, jika solusi Sudoku sudah Benar	65
Gambar 4.23	Soal pengujian permainan Sudoku dengan tingkat kesulitan sulit (<i>hard</i>) dari situs web http://www.websudoku.com/	68
Gambar 4.24	Pengisian soal permainan Sudoku yang akan diuji ke dalam Sistem	68
Gambar 4.25	Hasil solusi soal Sudoku menggunakan Sudoku <i>solver</i> , beserta catatan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikannya dalam satuan detik	69
Gambar 4.26	Solusi Sudoku dimasukkan ke permainan Sudoku di situs web http://www.websudoku.com/	70
Gambar 4.27	Halaman web baru yang muncul, jika solusi Sudoku sudah Benar	70
Gambar 4.28	Hasil perhitungan menggunakan fungsi Anova pada Microsoft Excel	79
Gambar 4.29	Contoh kurva <i>F distribution</i>	80
Gambar 4.30	<i>Screenshot</i> dari salah satu contoh sistem yang gagal dalam memberikan solusi soal Sudoku tingkat kesulitan menengah (<i>medium</i>)	83
Gambar 4.31	Potongan baris kode penyimpanan warna untuk pewarnaan	

verteks-verteks graf Sudoku yang disimpan dalam bentuk <i>array</i> satu dimensi.....	83
Gambar 4.32 Potongan baris kode <i>array</i> penyimpanan warna untuk pewarnaan verteks-verteks graf Sudoku yang telah ditambah 1 kapasitas warna tambahan	84
Gambar 4.33 Hasil pengujian ulang soal Sudoku pada Gambar 4.30.....	84
Gambar 4.34 <i>Screenshot</i> dari salah satu contoh sistem yang gagal dalam memberikan solusi soal Sudoku tingkat kesulitan sulit (<i>hard</i>).....	85
Gambar 4.35 Hasil pengujian ulang soal Sudoku pada Gambar 4.34.....	85
Gambar 4.36 <i>Screenshot</i> dari salah satu contoh sistem yang gagal dalam memberikan solusi soal Sudoku tingkat kesulitan sulit (<i>hard</i>).....	86
Gambar 4.37 Hasil pengujian ulang soal Sudoku pada Gambar 4.36.....	86
Gambar 4.38 Pengujian sistem pada soal Sudoku dengan pola simetris tertentu (gagal)	87
Gambar 4.39 Pengujian sistem pada soal Sudoku dengan pola simetris tertentu (gagal)	88
Gambar 4.40 Pengujian sistem pada soal Sudoku dengan pola simetris tertentu (gagal)	88
Gambar 4.41 Pengujian sistem pada soal Sudoku dengan pola simetris tertentu.....	89
Gambar 4.42 Pengujian sistem dari soal Sudoku dengan pola simetris tertentu pada Gambar 4.41 (berhasil)	89

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1	Penyajian data hasil pengujian pada Tabel 4.1	62
Grafik 4.2	Penyajian data hasil pengujian pada Tabel 4.3	67
Grafik 4.3	Penyajian data hasil pengujian pada Tabel 4.5	72
Grafik 4.4	Perbandingan data catatan waktu (detik) hasil pengujian Sudoku kategori tingkat kesulitan mudah (<i>easy</i>), menengah (<i>medium</i>) dan sulit (<i>hard</i>)	73

©UKPDW

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

<i>Listing code</i> Form1.cs	A-1
<i>Listing code</i> inisialisasi warna & cell untuk Sudoku puzzle	A-2
<i>Listing code</i> proses menampilkan Sudoku	A-3
<i>Listing code</i> inisialisasi warna tiap subgrid (3×3) yang berbeda	A-3
<i>Listing code</i> cek untuk aturan sudoku (cek verteks adjacent)	A-4
<i>Listing code</i> cek untuk angka yang bisa dimasukkan ke dalam cell	A-4
<i>Listing code</i> simpan soal / solusi Sudoku	A-4
<i>Listing code</i> proses solving Sudoku	A-5
<i>Listing code</i> proses solving Sudoku (lanjutan)	A-6
<i>Listing code</i> proses fungsi buka soal / solusi Sudoku	A-6
<i>Listing code</i> fungsi tombol Solve	A-7
<i>Listing code</i> algoritma greedy graph coloring (tidak dimodifikasi)	A-7
<i>Listing code</i> menampilkan seluruh nilai ke dalam cell-cell Sudoku	A-8
<i>Listing code</i> algoritma greedy graph coloring (dimodifikasi)	A-8
<i>Listing code</i> proses Reset	A-9
<i>Listing code</i> cek jawaban manual pemain	A-9
<i>Listing code</i> ToolStripMenuItem1 untuk menampilkan halaman Tentang Penulis	A-9
<i>Listing code</i> memuat salah satu soal Sudoku secara otomatis saat program dijalankan	A-10

LAMPIRAN B

Penyajian Graf Sudoku Dalam Bentuk Matriks <i>Adjacency</i>	B-1
Easy-1, jumlah <i>clue</i> 34	B-2
Easy-2, jumlah <i>clue</i> 35	B-5
Easy-3, jumlah <i>clue</i> 35	B-8
Easy-4, jumlah <i>clue</i> 35	B-11
Easy-5, jumlah <i>clue</i> 34	B-14
Easy-6, jumlah <i>clue</i> 36	B-17

Easy-7, jumlah <i>clue</i> 33	B-20
Easy-8, jumlah <i>clue</i> 34	B-23
Easy-9, jumlah <i>clue</i> 36	B-26
Easy-10, jumlah <i>clue</i> 34	B-29
Easy-11, jumlah <i>clue</i> 33	B-32
Easy-12, jumlah <i>clue</i> 33	B-35
Easy-13, jumlah <i>clue</i> 35	B-38
Easy-14, jumlah <i>clue</i> 33	B-41
Easy-15, jumlah <i>clue</i> 36	B-44
Easy-16, jumlah <i>clue</i> 36	B-47
Easy-17, jumlah <i>clue</i> 32	B-50
Easy-18, jumlah <i>clue</i> 36	B-53
Easy-19, jumlah <i>clue</i> 36	B-56
Easy-20, jumlah <i>clue</i> 36	B-59
Medium-1, jumlah <i>clue</i> 30	B-62
Medium-2, jumlah <i>clue</i> 29	B-65
Medium-3, jumlah <i>clue</i> 29	B-68
Medium-4, jumlah <i>clue</i> 30	B-71
Medium-5, jumlah <i>clue</i> 31	B-74
Medium-6, jumlah <i>clue</i> 28	B-77
Medium-7, jumlah <i>clue</i> 32	B-80
Medium-8, jumlah <i>clue</i> 29	B-83
Medium-9, jumlah <i>clue</i> 30	B-86
Medium-10, jumlah <i>clue</i> 28	B-89
Medium-11, jumlah <i>clue</i> 28	B-92
Medium-12, jumlah <i>clue</i> 29	B-95
Medium-13, jumlah <i>clue</i> 29	B-98
Medium-14, jumlah <i>clue</i> 28	B-101
Medium-15, jumlah <i>clue</i> 31	B-104
Medium-16, jumlah <i>clue</i> 30	B-107
Medium-17, jumlah <i>clue</i> 32	B-110

Medium-18, jumlah <i>clue</i> 30	B-113
Medium-19, jumlah <i>clue</i> 29	B-116
Medium-20, jumlah <i>clue</i> 30 (Gagal Solve)	B-119
Hard-1, jumlah <i>clue</i> 26.....	B-122
Hard-2, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-125
Hard-3, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-128
Hard-4, jumlah <i>clue</i> 27.....	B-131
Hard-5, jumlah <i>clue</i> 26 (Gagal Solve).....	B-134
Hard-6, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-137
Hard-7, jumlah <i>clue</i> 26.....	B-140
Hard-8, jumlah <i>clue</i> 27.....	B-143
Hard-9, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-146
Hard-10, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-149
Hard-11, jumlah <i>clue</i> 26.....	B-152
Hard-12, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-155
Hard-13, jumlah <i>clue</i> 26.....	B-158
Hard-14, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-161
Hard-15, jumlah <i>clue</i> 26.....	B-164
Hard-16, jumlah <i>clue</i> 28 (Gagal Solve).....	B-167
Hard-17, jumlah <i>clue</i> 27.....	B-170
Hard-18, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-173
Hard-19, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-176
Hard-20, jumlah <i>clue</i> 28.....	B-179

LAMPIRAN C

Kartu Konsultasi Tugas Akhir Dosen Pembimbing I	C-1
Kartu Konsultasi Tugas Akhir Dosen Pembimbing II.....	C-2
Kartu Konsultasi Tugas Akhir Dosen Pembimbing I	C-3

INTISARI

ALGORITMA *GREEDY GRAPH COLORING* UNTUK MENYELESAIKAN PERMAINAN SUDOKU

Sudoku merupakan sebuah *board game* yang sangat populer. Terdapat banyak jenis Sudoku, yang paling dikenal, yaitu *plain* Sudoku 9×9 . Aturan permainan ini sangat sederhana. Seorang pemain hanya perlu mengisi angka di antara 1 sampai 9 pada *cell-cell* yang kosong, dengan syarat tidak boleh ada angka yang sama dalam satu baris, kolom atau subgrid.

Dari aturan permainan tersebut, Sudoku dapat dilihat sebagai permasalahan pewarnaan graf. *Cell* merupakan verteks, angka 1 sampai 9 merupakan warna dan aturan penulisan angka sebagai verteks-verteks *adjacent*. Aturan permainan yang sederhana namun membutuhkan ketelitian ini membuat para penikmat *board game* sangat menyukainya. Karenanya, penulis merasa tertarik untuk melakukan penelitian tentang Sudoku dan pewarnaan graf.

Di dalam disiplin ilmu graf, terdapat banyak metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pewarnaan graf, salah satunya yaitu *greedy graph coloring*. Metode ini akan diimplementasikan pada sistem (*Sudoku Solver*) dengan sedikit perubahan. Dari hasil pengujian yang dilakukan penulis, pada tiga tingkat kesulitan soal Sudoku (mudah, menengah dan sulit), masing-masing 20 soal, tiap kategori dan total 60 soal, diperoleh hasil yang baik dengan rata-rata keseluruhan tingkat keberhasilan mencapai 95%. Kegagalan penyelesaian disebabkan oleh kurangnya angka (warna) yang digunakan dalam sistem.

Kata kunci : *Sudoku, Greedy Graph Coloring, Graph Theory, Algoritma Graf*

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sudoku (atau "*Number Place*") merupakan sebuah permainan yang sangat populer. Permainan Sudoku berasal dari kata *Latin Square* yang pertama kali diperkenalkan oleh Leonhard Euler pada tahun 1783, sedangkan permainan ini sendiri pertama kali dibuat untuk Dell Magazines oleh Howard Garnes yang merupakan seorang arsitek dari Indianapolis. Howard Garnes memperkenalkan permainan ini di Amerika Serikat pada tahun 1979. Tujuh tahun kemudian permainan *puzzle* ini sangat disukai dan populer di Jepang. Perusahaan di Jepang yang pertama kali mempublikasikannya yaitu perusahaan Nikoli dengan nama permainan yang tidak diubah, Sudoku yang dalam bahasa Jepang berarti "*single number*", *su* berarti angka dan *doku* berarti sendiri.

Kepopuleran permainan ini terus berkembang dan dikenal di seluruh dunia. Sudoku memiliki beberapa varian, di antaranya yaitu : *plain* Sudoku (biasa hanya disebut Sudoku), Logi-5, Sudoku X, *Hypersudoku* (*Windocu*), Samurai Sudoku, *circular* Sudoku, *Sudokucube* dan "*nonconsecutive*" Sudoku. Pada penelitian ini, penulis akan melakukan penelitian pada *plain* Sudoku (Sudoku).

Aturan permainan ini cukup sederhana. Di dalam permainan Sudoku terdapat total 81 kotak (*cell*) yang dibagi menjadi 9 *cell* baris dan 9 *cell* kolom yang dibagi lagi menjadi tiga bagian yang terdiri dari 3×3 kotak (subgrid). Permainan dapat diselesaikan dengan mengisi angka mulai dari 1 sampai 9 pada tiap bagian dengan syarat tidak boleh ada angka yang sama pada tiap subgrid (3×3 kotak), dalam satu baris serta dalam satu kolom. Sebagai petunjuk awal, pada kotak-kotak tertentu dalam tiap bagian, akan diisi angka awal, kemudian pemain melanjutkan dengan mengisi kotak-kotak yang masih kosong

dengan mempertimbangkan syarat-syarat di atas. Di dalam permainan ini, pemain tidak perlu menghitung angka-angka yang tersedia di dalam kotak untuk menyelesaikan permainan, pemain hanya perlu menggunakan logika untuk menyelesaikannya.

Angka-angka awal dalam tiap kotak merupakan angka acak yang diisikan, namun tetap tidak menyalahi aturan permainan atau syarat penyelesaian permainan yang telah disebutkan di atas. Di dalam ilmu komputer, penentuan angka awal dalam permainan Sudoku dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu *incremental generation*, *decremental generation*, *exact cover*, *stochastic search*, *constraint programming*, *brute-force algorithm* dan *backtracking*, namun dalam penelitian ini, penulis hanya akan terfokus pada metode penyelesaian permainan Sudoku untuk mendapatkan solusi penyelesaian permainan yang tepat. Untuk solusi penyelesaian permainan ini dapat dicari dengan menggunakan beberapa metode dari berbagai disiplin ilmu, seperti kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) atau algoritma graf (*graph algorithm*). Pada penelitian ini, penulis akan menggunakan algoritma pewarnaan graf (*graph coloring algorithm*) dengan menggunakan teknik sekuensial *heuristic* pewarnaan graf *Greedy* (*Greedy graph coloring algorithm heuristic sequential technique*) dari disiplin ilmu algoritma graf untuk mencari solusi permainan Sudoku.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan di dalam penelitian ini, antara lain :

- a. Apakah dengan menggunakan algoritma pewarnaan graf *Greedy* (*Greedy graph coloring algorithm*), sistem dapat menentukan solusi yang sesuai untuk menyelesaikan permainan Sudoku?
- b. Apakah rata-rata waktu penyelesaian (*solving*) permainan Sudoku terpengaruh oleh tingkat kesulitan Sudoku?

1.3. Batasan Sistem

Pada penelitian ini, penulis memberikan batasan sistem yang akan dibuat, antara lain :

- a. Sistem dapat memproses soal permainan Sudoku dengan cara angka awal yang telah diisikan sebelumnya dengan tepat sesuai aturan permainan Sudoku ke dalam sistem.
- b. Sistem yang akan dibuat, yaitu *plain Sudoku Solver (9x9)*.

1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah algoritma *greedy graph coloring* yang diterapkan pada *Sudoku solver* mampu menyelesaikan permainan Sudoku dengan tepat serta apakah waktu penyelesaian yang dibutuhkan terpengaruh oleh tingkat kesulitan soal permainan Sudoku.

1.5. Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu :

1.5.1. Metode Studi Pustaka

Metode ini dilakukan dengan mempelajari literatur berupa jurnal ilmiah, buku serta materi-materi yang berkaitan dengan topik penelitian.

1.5.2. Perancangan Sistem

Tahapan dalam perancangan sistem ini, yaitu dengan men-*generate* angka awal untuk permainan Sudoku. Tahap ini dilakukan secara manual oleh peneliti dengan cara memasukkan angka-angka awal Sudoku yang diperoleh dari situs web <http://www.websudoku.com/>. Setelah angka awal dimasukkan, kemudian peneliti menggunakan *Sudoku solver* yang mengimplementasikan algoritma *greedy graph coloring* untuk menentukan solusi dari permainan Sudoku tersebut

pada tiap-tiap kategori tingkat kesulitan. Sistem ini akan dibuat dengan bahasa pemrograman C#, dengan *framework* Microsoft Visual Studio 2010.

1.5.3. Implementasi dan Pengujian

Pengujian Sudoku *solver* dengan angka awal (*clue*) yang dibagi menjadi tiga kategori tingkat kesulitan (*easy*, *medium* dan *hard*). Pada tahapan ini, data angka awal (*clue*) permainan Sudoku diperoleh dari situs web <http://www.websudoku.com/>. *An In Depth Analysis Of Sudoku With Focus In Integer And Constraint Programming* (Thein, M., 2014).

Data tersebut kemudian diisikan pada *cell-cell* Sudoku secara manual. Pengujian Sudoku *solver* dilakukan per kategori tingkat kesulitan Sudoku. Berdasarkan sumber-sumber yang digunakan penulis sebagai acuan yang ditampilkan pada Tabel 2.1 pada bagian Tinjauan Pustaka, Bab 2, pengujian dilakukan pada data *clue* sebanyak 60 data yang kemudian dibagi menjadi 3 kategori tingkat kesulitan, sehingga tiap tingkat kesulitan diujikan data *clue* sebanyak 20 data.

1.5.4. Analisis

Analisis sistem akan didasarkan pada beberapa aspek berikut :

1.5.4.1. Kecepatan Sudoku *solver* dalam menyelesaikan permainan Sudoku (dalam satuan waktu detik). Pengujian sistem dilakukan pada soal permainan Sudoku dengan tiga kategori tingkat kesulitan (*easy*, *medium* dan *hard*).

1.5.4.2. Prosentase tingkat keberhasilan sistem

Prosentase tingkat keberhasilan sistem dalam menyelesaikan tiap data pengujian pada masing-masing kategori tingkat kesulitan (*easy*, *medium* dan *hard*). Berggren, P., & Nilsson, D. dalam penelitiannya yang berjudul *A Study Of Sudoku Solving Algorithms*, sistem akan dinyatakan gagal jika tidak dapat menyelesaikan permainan Sudoku kurang dari atau sama dengan 20 detik. Pada penelitian ini, sistem

dinyatakan gagal apabila langkah penyelesaian permainan Sudoku melebihi 20.000 langkah (perulangan langkah lebih dari 20.000 kali dalam satu soal pegujian).

1.5.5. Konsultasi

Konsultasi dengan dosen pembimbing rutin dilakukan sehubungan dengan tata cara penulisan mulai dari awal penulisan hingga pada pengumpulan laporan tugas akhir.

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini dibagi menjadi 5 bab. Bab 1, merupakan Bab Pendahuluan. Bagian ini memuat latar belakang masalah, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian dan sistematika penelitian. Bab 2 dibagi menjadi dua bagian, yaitu tinjauan pustaka dan landasan teori. Tinjauan pustaka memuat sumber-sumber tentang hasil penelitian pihak-pihak lain, tinjauan pustaka diperoleh dari sumber pustaka, seperti jurnal ilmiah, buku dan laporan penelitian. Untuk landasan teori menguraikan tentang konsep dan prinsip utama yang digunakan untuk memecahkan masalah dari penelitian tugas akhir ini.

Setelah kedua bab tersebut, selanjutnya adalah penyusunan bab 3, 4 dan 5. Pada bab 3, diuraikan mengenai analisis dan perancangan sistem yang akan dibangun. Tahap ini menguraikan perancangan proses, antar muka, diagram, serta penjelasan mengenai algoritma-algoritma yang diterapkan pada sistem. Bab 4 berisi tentang implementasi dan analisis sistem. Bagian ini menjelaskan penerapan sistem yang dibuat, yaitu Sudoku *solver*, yang mengimplementasikan algoritma *greedy graph coloring*. Pada bab ini juga dilakukan analisis secara menyeluruh dari perancangan yang telah dilakukan pada bab 3. Bab yang terakhir, yaitu bab 5 memuat kesimpulan dan saran dari keseluruhan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh penulis diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu :

- a. Algoritma pewarnaan graf *greedy* (*greedy graph coloring algorithm*) yang sudah mengalami modifikasi (penambahan rekursi) yang diterapkan pada sistem (*Sudoku Solver*) pada pengujian soal Sudoku dengan tiga kategori tingkat kesulitan (*easy*, *medium* dan *hard*) memiliki prosentase tingkat keberhasilan yang tinggi. Dari hasil pengujian pada tingkat kesulitan mudah (*easy*), tingkat keberhasilan penyelesaian soal Sudoku mencapai 100%, pada tingkat kesulitan menengah (*medium*), tingkat keberhasilan penyelesaian soal Sudoku mencapai 95% dan pada tingkat kesulitan sulit (*hard*), tingkat keberhasilan penyelesaian soal Sudoku mencapai 90% dengan data uji soal Sudoku berjumlah 20 soal pada tiap kategori tingkat kesulitan, sehingga total data uji soal Sudoku berjumlah 60 soal. Rata-rata tingkat keberhasilan sistem secara keseluruhan, yaitu 95%. Algoritma pewarnaan graf *greedy* yang belum dimodifikasi kurang cocok untuk penyelesaian masalah Sudoku, karena karakteristik algoritma tersebut yang mencari solusi optimum dalam lingkup lokal, tanpa memperhatikan faktor lain yang mungkin mempengaruhi solusi optimum pada tingkat global (*take what you can get now!*), sehingga jika diterapkan ke dalam sistem akan meningkatkan resiko kegagalan pencarian solusi optimum global permainan Sudoku.
- b. Dari tingkat keberhasilan penyelesaian data uji soal Sudoku yang mencapai 95%, terdapat 3 soal yang gagal diselesaikan. Kegagalan dalam penyelesaian soal Sudoku ini, disebabkan oleh terbatasnya jumlah warna

(atau angka 1-9) yang digunakan untuk mewarnai verteks-verteks graf permainan Sudoku 9×9 . Dalam teorema Brook disebutkan bahwa jumlah warna maksimum (bilangan kromatik) yang dapat digunakan untuk menyelesaikan suatu permasalahan pewarnaan graf, merupakan jumlah derajat simpul (*degree*) tertinggi + 1 atau $\chi(G) \leq d_{\text{tertinggi}} + 1$. Pada graf Sudoku 9×9 tiap verteks memiliki derajat simpul (*degree*) berjumlah 20, sehingga dari teorema Brook dapat diketahui bahwa jumlah warna yang dapat digunakan, yaitu : $\chi(G) \leq 20 + 1 : \chi(G) \leq 21$ warna. Oleh karena angka yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permainan Sudoku hanya berjumlah 9 (angka 1-9) atau hanya terdapat 9 warna untuk mewarnai verteks-verteks dalam graf Sudoku, yang bahkan kurang dari setengah jumlah warna maksimum, maka kurangnya jumlah warna untuk mewarnai verteks-verteks graf Sudoku itulah yang menyebabkan sistem gagal dalam menyelesaikan ketiga soal Sudoku tersebut.

- c. Pola atau tata letak *clue* soal pada *cell-cell* Sudoku kemungkinan juga berpengaruh pada tingkat keberhasilan penyelesaian soal Sudoku. Hal ini disebabkan oleh proses *solving* pada sistem yang terurut dari *cell* pertama, kemudian menuju ke *cell* berikutnya, yaitu *cell* kedua dan seterusnya, maka kemungkinan tata letak *clue* soal Sudoku ini juga mempengaruhi tingkat keberhasilan sistem dalam menyelesaikan soal Sudoku yang diujikan.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh penulis, maka dapat diberikan saran, sebagai berikut :

- a. Algoritma pewarnaan graf *greedy* yang sudah mengalami modifikasi dapat dicoba untuk diterapkan pada jenis permainan Sudoku yang lain, seperti Sudoku 4×4 , *circular* Sudoku, *Sudokucube* atau jenis yang lainnya.

- b. Oleh karena karakteristik algoritma pewarnaan graf *greedy* yang mencari solusi optimum lokal, maka algoritma ini dapat diterapkan secara maksimal untuk permasalahan optimalisasi, misal pencarian rute terdekat atau termurah suatu lokasi dengan mempertimbangkan bobot-bobot tiap opsi rute untuk dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan atau bentuk permasalahan optimalisasi lain yang sejenis.
- c. Jika mengalami kendala dalam menyelesaikan suatu permasalahan pewarnaan graf, dapat dicoba dengan menambahkan jumlah warna tertentu yang berbeda, namun tetap memperhatikan jumlah maksimum warna yang dapat digunakan.

©UKDW

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Omari, H., & Sabri, K., E. (2006). New Graph Coloring Algorithm. *American Journal of Mathematics and Statistics* 2 (4): 739-741.
- A.M. Herzberg & M.R. Murty. Sudoku Squares And Chromatic Polynomials. *Notices Amer. Math. Soc.* 54(6), 708-717 (2007).
- Ardiansyah, Efendi, F., S., Syaifullah, Pinto, M., Pujianto, & Tempake, H., S. (2010). Implementasi Algoritma Greedy Untuk Melakukan Graph Coloring : Studi Kasus Peta Propinsi Jawa Timur. *Jurnal Informatika Vol. 4 No. 2*.
- Berggren, P., & Nilsson, D. A Study Of Sudoku Solving Algorithms. *Bachelor's Thesis*. Kungliga Tekniska Högskolan Computer Science And Communication. Stockholm, Sweden
- Chatterjee, S., Paladhi, S., & Chakraborty, R. (2014). A Comparative Study On The Performance Characteristics Of Sudoku Solving Algorithms. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE) Volume 16 Issue 5*, 69 - 77.
- Grados, F., & Mohammadi, A. (2013). A Report On The Sudoku Solver. *Bachelor's Essay*. Kungliga Tekniska Högskolan dept. Computer Science. Stockholm, Sweden
- Mann, P.S., & Lacke, C.J. (2010). Introductory Statistics Seventh Edition. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.
- Mansuri, A., Gupta, V., & Chandel, R., S. (2010). Coloring Programs In Graph Theory. *Int. Journal of Math. Analysis Vol. 4 no. 50*, 2473 – 2479.
- Mussafi, N., S., M. (2015). Penerapan Greedy Coloring Algorithm Pada Peta Kotamadya Yogyakarta Berbasis Four-Colour Theorem. *Kaunia Vol. XI No. 1*, 19-26.

Thein M. (2014). An In Depth Analysis Of Sudoku With Focus In Integer And Constraint Programming. *M.Sc. Thesis*. The Pennsylvania State University The Graduate School. 114 Kern Bldg, University Park, PA 16802, United States

©UKPDW