



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN METODE RUNGE-KUTTA ORDE 4
UNTUK TEMPORAL DOMAIN SOLUSI ALIRAN AIR TANAH
PADA LAPISAN TAK JENUH**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**FIRMAN REZA PERSADA
0606072250**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR
DEPOK
JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Firman Reza Persada

NPM : 0606072250

Tanda Tangan :

Tanggal : 10 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Firman Reza Persada
NPM : 0606072250
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Pemanfaatan Metode Runge-Kutta Orde 4 untuk Temporal Domain Solusi Aliran Air Tanah Pada Lapisan Tak Jenuh

telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlakukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : DR –Ing. Ir. Dwita. S, Dipl HE (.....)

Pembimbing II: Ir. Herr Soeryantono, M.Sc. Ph.D (.....)

Penguji I : RR. Dwinanti Rika M, S.T, M.T (.....)

Penguji II : Ir. Siti Murniningsih, M.Si. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 10 Januari 2011

UCAPAN TERIMA KASIH

Syukur Alhamdulillah, atas kepastian dari Allah SWT penulisan skripsi ini dapat diselesaikan. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Progam Studi Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari, bahwa tersusunnya skripsi ini bukan semata jerih payah Penulis sendiri, namun juga berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Dr-Ing Dwita Sutjiningsih K.M, Dipl dan Bapak Ir. Herr Soeryantono, M.Sc, Ph.D, selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak menyediakan waktu dalam memberikan pengarahan, dukungan serta kesabarannya selama penulis menyelesaikan skripsi ini.
2. Ibu Ir. Siti Murniningsih, M.Si dan Mba Dwinanti, S.T, M.T, selaku penguji yang telah memberikan masukannya pada penulisan skripsi ini.
3. Ibu Ir. Ellen S. W. Tangkudung, M.Sc, selaku Pembimbing Akademis.
4. Mama dan Papa, atas nasihat dan dukungannya selama menempuh Studi di Fakultas Teknik.
5. Kakek, (almh) Nenek, dan keluarga, atas dukungan dan motivasinya untuk menyelesaikan skripsi ini.
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Irwan Katili dan pada Dosen Departemen Teknik Sipil yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
7. Rekan-rekan seperjuangan peminatan MSDA angkatan 2006: Feri, Pendi, Bismi, Fara, Indah, Keisha, Uud, dan Ircas, serta rekan-rekan peminatan MSDA angkatan 2007, atas kerjasama dan motivasinya.
8. Rekan-rekan seperjuangan Mahasiswa Teknik Sipil 2006, atas kebersamaannya selama menempuh studi di Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
9. Rekan-rekan seperjuangan Lembaga Kemahasiswaan Ikatan Keluarga Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Indonesia, atas kebersamaan dan pembelajaran selama berada di Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

10. Pak Bagyo, Mba Upik dan Mba Wiwid, atas bantuannya, serta pihak-pihak lain yang tidak bisa disebutkan satu-persatu yang telah membantu dalam penulisan skripsi ini.

Akhir kata Penulis menyenandungkan satu harapan, semoga Allah berkenan dengan penulisan skripsi ini dan semoga penulisan skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan pengembangan ilmu pengetahuan.

Jakarta, Januari 2011

Firman Reza Persada



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Firman Reza Persada
NPM : 0606072250
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non Eksklusif (*Non-Exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pemanfaatan Metode Runge-Kutta Orde 4 untuk Temporal Domain Solusi Aliran Air Tanah Pada Lapisan Tak Jenuh

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 10 Januari 2011

Yang menyatakan,

(Firman Reza Persada)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
ABSTRAK (INDONESIA).....	vii
ABSTRACT (ENGLISH)	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Tujuan Penulisan.....	2
1.3.Ruang Lingkup Permasalahan	2
1.4.Metodelogi Pengembangan Model	3
1.5.Sistematika Penulisan	4
2. PERSAMAAN UMUM ALIRAN AIR TANAH PADA LAPISAN TAK JENUH AIR.....	5
2.1.Air Tanah	5
2.2.Lapisan Tak Jenuh Air (<i>unsaturated zone</i>).....	6
2.3. <i>Characteristic Curve</i> Sebagai Parameter Hidrolis Lapisan Tak Jenuh Air ..	9
2.4.Hukum Kekekalan Massa	11
2.5.Persamaan Aliran Air Tanah pada Lapisan Tak Jenuh Air.....	14
3. PENGEMBANGAN MODEL ALIRAN AIR TANAH PADA LAPISAN TAK JENUH AIR	17
3.1.Metode Beda Hingga (<i>Finite Difference Method</i>).....	17
3.2.Metode <i>Runge-Kutta</i>	20
3.2.1. Kondisi Batas Metode Runge Kutta.....	21
3.2.2. Penyelesaian Sistem Persamaan Linear	22
3.3.Pengembangan Model Matematis ke Dalam Model Komputer.....	23
3.4.Langkah-langkah Pemakaian Model.....	27
4. PENGUJIAN DAN PENERAPAN MODEL PROGRAM ALIRAN AIR TANAH PADA KOMPUTER	29
4.1.Umum	29
4.2.Pengujian Model Komputer terhadap Perhitungan Manual.....	30
4.3.Pengujian Terhadap Pengaruh Kemampuan Mensimulasi Paramater Model	32
4.3.1. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Jarak Antar Nodal Pada Arah Sumbu X (Δx)	32

4.3.2. Pengujian Insensivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Waktu untuk Setiap Kali Putaran (<i>Loop</i>) Komputasi	34
4.4. Analisa Pengujian Terhadap Pengaruh Kemampuan Mensimulasi Paramater Model.....	36
4.5. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Waktu untuk Setiap Kali Putaran (<i>Loop</i>) Komputasi	41
4.6. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih jarak Antar Nodal Pada arah Sumbu X.....	43
4.7. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Parameter Lapangan	46
4.7.1. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai <i>Saturated Conductivity</i>	47
4.7.2. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai Saturasi Residual.....	50
4.7.3. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai <i>n</i> dan <i>a</i>	53
4.7.4. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai Porositas	58
4.8. Pengujian Model terhadap Pemilihan Jumlah Nodal.....	61
4.9. Penerapan Progam Aliran Air Tanah.....	63
4.9.1. Proses Infiltrasi pada Jenis Tanah Non Homogen	63
4.9.2. Proses <i>Imbibition</i> pada Jenis Tanah Homogen	65
4.9.3. Proses <i>Imbibition</i> pada Jenis Tanah Non Homogen	67
5. KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran	70
DAFTAR REFERENSI	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Distribusi air di bawah permukaan tanah.....	6
Gambar 2.2.	Pipa kapiler 7	
Gambar 2.3.	Diagram definisi untuk ϕ_c	8
Gambar 2.4.	Histeresis antara $\theta_w - h_c$ pada material berbutir kasar	10
Gambar 2.5.	<i>Retention Curve</i>	11
Gambar 2.6.	Elemen <i>Control Volume</i>	13
Gambar 3.1.	Pemodelan Lapisan Tanah untuk Formulasi Numerik.....	22
Gambar 3.2.	Contoh Masukan (<i>input</i>) Data.....	24
Gambar 3.3.	Diagram Alur Model Aliran Air Tanah pada Lapisan Tak Jenuh Air	26
Gambar 3.4.	Kotak Dialog	27
Gambar 4.1.	Perbandingan Saturasi Perhitungan Model Komputer dengan Perhitungan <i>Microsoft Excel</i>	31
Gambar 4.2.	Grafik Hubungan Saturasi terhadap Waktu untuk berbagai variasi Δx	33
Gambar 4.3.	Grafik Hubungan Saturasi terhadap waktu untuk berbagai variasi nT	35
Gambar 4.4.	Saturasi untuk Berbagai Macam Pengujian	39
Gambar 4.5.	Grafik Saturasi untuk Berbagai Nilai nT pada Nilai $h_c = 50$ cm	42
Gambar 4.6.	Grafik Saturasi untuk Berbagai Nilai Δx pada $h_c = 50$ cm	45
Gambar 4.7.	Grafik Saturasi terhadap Kedalaman pada Berbagai K_s	48
Gambar 4.8.	Grafik Saturasi terhadap Waktu pada Berbagai K_s	49
Gambar 4.9.	Grafik Saturasi untuk Setiap Kedalaman pada Berbagai S_r	52
Gambar 4.10.	Grafik Hubungan Saturasi terhadap Kedalaman pada Berbagai Nilai n	55
Gambar 4.11.	Grafik Hubungan Saturasi terhadap Kedalaman pada Berbagai Nilai a	57
Gambar 4.12.	Grafik Hubungan Saturasi terhadap Kedalaman pada Berbagai Nilai Porositas	60
Gambar 4.13.	Grafik Saturasi Pengujian Model terhadap Berbagai Jumlah Nodal	62
Gambar 4.14.	Kontur Saturasi pada Proses Infiltrasi pada Jenis Tanah Non Homogen Untuk $T = 2000$ menit	64
Gambar 4.15.	Kontur Saturasi pada Proses <i>Imbibition</i> pada Jenis Tanah Homogen untuk $T = 1445$ menit	66
Gambar 4.16.	Kontur Saturasi pada Proses <i>Imbibition</i> pada Jenis Tanah Homogen untuk $T = 2000$ menit	66
Gambar 4.17.	Kontur Saturasi pada Proses <i>Imbibition</i> pada Jenis Tanah Non Homogen untuk $T = 2000$ menit	68

DAFTAR LAMPIRAN

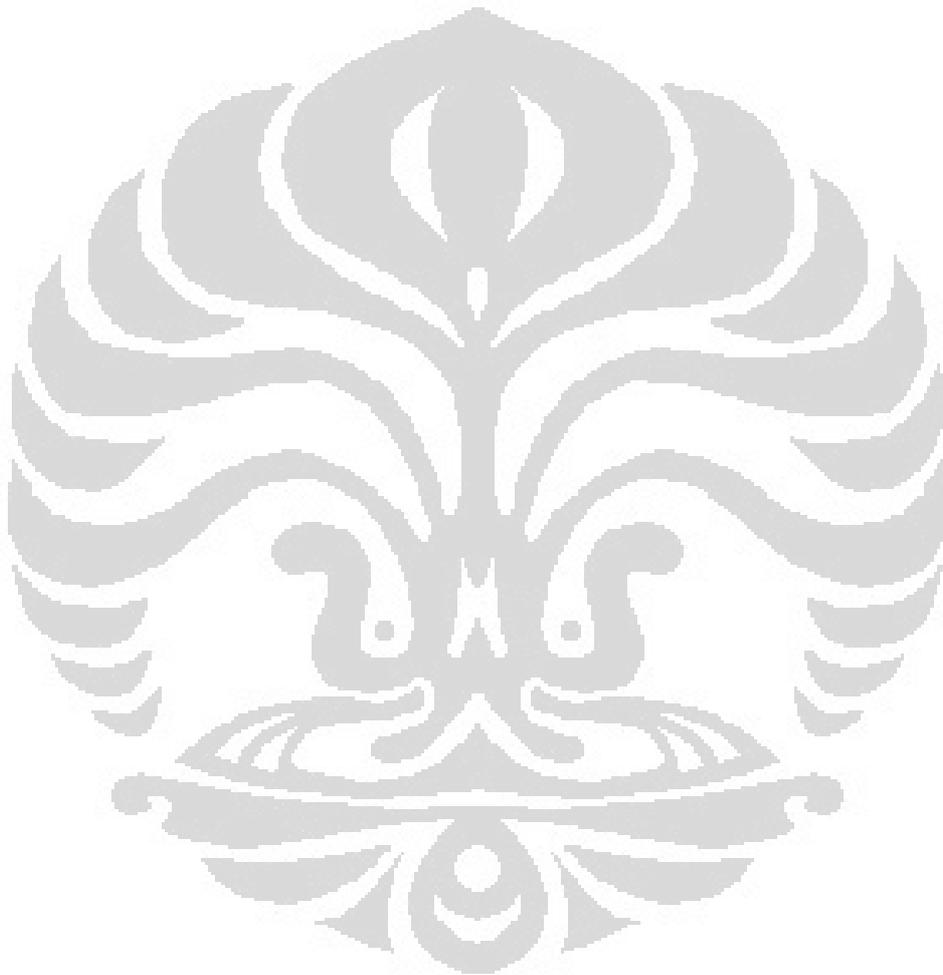
Lampiran 1: Penulisan kedalam *Visual Basic for Microsoft Excel 2007*

Lampiran 2: Contoh Masukan (*Input*) Data Parameter

Lampiran 3: Keluaran (*Output*) Program Aliran Skema Runge Kutta

Lampiran 4: Penjelasan Pengujian Program Aliran Skema Runge Kutta

Lampiran 5: *User Manual* Program Aliran Skema Runge Kutta



ABSTRAK

Nama : Firman Reza Persada
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Pemanfaatan Metode Runge-Kutta Orde 4 untuk Temporal Domain Solusi Aliran Air Tanah Pada Lapisan Tak Jenuh

Salah satu alternatif untuk memprediksi karakteristik aliran air tanah di lapisan tak jenuh secara analitis adalah menggunakan persamaan Richards. Sayangnya persamaan ini mengandung turunan pertama yang umumnya memberi bias cukup berarti bila diselesaikan dengan menggunakan metode Beda Hingga. Tulisan ini mengkaji pemanfaatan metode Runge-Kutta Orde 4 untuk penyelesaian turunan pertama pada domain temporal tersebut. Pengujian atas program komputer yang dibuat berdasarkan ide ini dengan mengamati sensitivitas Δx , Δz , Δt , S_r , K_s , n , α , dan ϕ terlihat bahwa hasilnya stabil. Tetapi, algoritma yang dibuat ini ternyata belum bisa mengakomodasi situasi ketika saturasi tanah meningkat mendekati jenuh sempurna. Pada pengembangan selanjutnya masih perlu dilakukan penyempurnaan algoritma pada metode Runge-Kutta agar dapat dilakukan pada semua kondisi tanah.

Kata Kunci:

Aliran air tanah, lapisan tak jenuh air, tinggi tekanan kapiler, saturasi, persamaan Richards, metode Beda Hingga, metode Runge-Kutta Orde 4.

ABSTRACT

Name : Firman Reza Persada
Study Program : Civil Engineering
Title : The Use of Fourth Order Runge-Kutta Method to Solve The First Derivative of Temporal Domain in Unsaturated Flow

One of alternatives to predict of unsaturated flow is through Richards equation. Unfortunately, this equation contains first derivative which in general would give significant bias whwn solved using the Finite Difference method. This paper examines the use of Fourth Order Runge-Kutta as solution of the first derivative in temporal domain. Based on the observation on the sensitivity of Δx , Δz , Δt , S_r , K_s , n , α , and ϕ the use this model provides stable result. However, the algorithm employed can not simulate well the situation whwn soil saturation increase and reach near fully saturated condition. A further study is required to improve the algorithm using Runge-Kutta method.

Keyword:

Groundwater flow, unsaturated zone, capillary pressure head, saturation, Richards equation, Finite Difference Methods, The Fourth Order Runge-Kutta Methods.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Air merupakan kebutuhan primer bagi semua makhluk hidup dan merupakan salah satu komponen yang memegang peranan penting dalam kehidupan manusia. Sumber utama air adalah berasal dari air hujan alami. Kemudian air hujan tersebut mengalir bersama dengan air permukaan serta meresap kedalam tanah dan akan diserap oleh akar tanaman.

Dalam skema pengembangan dan manajemen suatu daerah, air tanah menjadi faktor yang harus dipertimbangkan seperti juga aliran permukaan. Pembicaraan mengenai air tanah biasanya akan merujuk kepada faktor kualitas dan kuantitas dari air tanah itu sendiri. Masalah pertumbuhan penduduk yang semakin tinggi mengakibatkan kebutuhan air yang semakin tinggi, namun ketersediaan air khususnya air tanah menjadi semakin berkurang akibat peningkatan lahan yang terbangun. Peningkatan lahan terbangun menyebabkan pengurangan ruang terbuka hijau yang besar terutama di daerah-daerah perkotaan. Banyak lahan hijau yang telah hilang, sehingga mengakibatkan daerah resapan menjadi berkurang. Oleh sebab itu, saat ini sering dilakukan suatu proyek pemanfaatan air hujan untuk menanggulangi ketersediaan air tanah, seperti lubang resapan biopori dan sumur resapan.

Untuk melakukan proyek pemanfaatan air hujan tersebut, maka kita harus mengetahui perilaku dari aliran air tanah itu sendiri. Sifat-sifat pergerakan air tanah pada lapisan tanah itu sendiri tergantung dari beberapa faktor, diantaranya adalah jenis lapisan tanah dimana air tanah itu berada. Jenis pergerakan air tanah pada lapisan tanah ada beberapa macam, diantaranya infiltrasi dan perkolasi. Pada saat air tanah dari permukaan tanah mengalir ke bawah menuju lapisan jenuh air melalui lapisan tak jenuh air, hal tersebut dinamakan infiltrasi (Bear, 1979). Sedangkan aliran air ke bawah dari lapisan tak jenuh air ke lapisan jenuh air dinamakan perkolasi (Soemarto, 1987).

Pergerakan aliran air tanah merupakan satu faktor penting dalam masalah air tanah dan juga diperlukan dalam merencanakan suatu bangunan air. Umumnya

karakteristik aliran air tanah diperoleh melalui pengujian laboratorium maupun lapangan. Selain itu karena dalam proses infiltrasi, air mengalir melalui suatu lapisan tak jenuh air, maka pemahaman dan kemampuan untuk menghitung dan memperkirakan pergerakan aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air menjadi penting. Salah satu alternatif untuk merealisasikan maksud tersebut adalah dengan membuat suatu perangkat lunak yang merupakan hasil pengembangan model matematik mampu mensimulasikan pergerakan aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air secara dua dimensi.

Model matematik yang digunakan pada karya tulis ini menggunakan Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*). Pada kajian sebelumnya, juga telah dibahas pengembangan model aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air dengan Metode Beda Hingga (Hendra Wijanoko, 1999) secara *implicit method* dengan formulasi numeriknya menggunakan metode *Newton Raphson*. Pada pembahasan kali ini, pengembangan model aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air dengan menggunakan metode *Runge Kutta* orde 4 pada domain temporal, karena penggunaan apabila menggunakan Metode Beda Hingga akan memberi bisa yang cukup berarti. Selanjutnya melalui metode ini diharapkan akan mampu mensimulasikan aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air dengan hasil keluaran yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan Metode *Newton Raphson*, karena dengan menggunakan Metode *Runge Kutta* orde 4 ini besarnya *flux* air tanah ditentukan menggunakan estimasi *slope* berkali-kali yang dikembangkan pada perubahan rata-rata *slope* dalam interval waktu sehingga menghasilkan akurasi perhitungan yang lebih stabil.

1.2. Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan karya tulis ini adalah untuk mengembangkan suatu model matematik yang diterapkan ke dalam Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*) yang mampu mensimulasikan aliran air tanah tak jenuh secara dua dimensi dengan menggunakan Metode *Runge Kutta* Orde 4. Sehingga dengan menggunakan model ini, akan mampu memperkirakan karakteristik aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air.

1.3. Ruang Lingkup Permasalahan

Dalam penulisan ini dibuat beberapa batasan yang sesuai dengan tujuan penulisan ini yaitu:

1. penulis menggunakan perangkat lunak *Visual Basic for Microsoft Excel 2007* sebagai perangkat pembantu untuk mensimulasikan proses pergerakan aliran air tanah yang terjadi, melalui rumusan matematis yang diselesaikan secara numerik dengan menggunakan komputer;
2. aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air bergerak sebagai aliran dua dimensi searah sumbu horizontal x dan vertikal z , dan hanya ada pergerakan air (udara tidak mengalir) tanpa adanya perubahan berat jenis air (ρ_w) akibat zat-zat solid terlarut;
3. media yang dimodelkan adalah media berpori yang tidak mengalami perubahan struktur pori akibat aliran air;
4. parameter-parameter yang akan ditinjau pengaruhnya terhadap keluaran model adalah nilai *saturated conductivity*, nilai yang mempengaruhi kelengkungan grafik saturasi dan letak dari *critical capillary head*, saturasi residual, diskretisasi ruang dan waktu, serta porositas;
5. data masukan (*input*) untuk contoh pengujian model menggunakan data hipotetis.

1.4. Metodologi Penelitian

Untuk mencapai tujuan dari penyusunan karya tulis ini yaitu mengembangkan suatu model matematik yang mampu mensimulasikan aliran tanah tak jenuh secara dua dimensi dengan menggunakan Metode *Runge Kutta* Orde 4, maka diperlukan suatu persamaan dasar (*governing equation*) aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air yang didapat berdasarkan studi literatur. Selanjutnya persamaan dasar ini diselesaikan dengan metode beda hingga yaitu secara *explicit* dengan menggunakan metode *Runge Kutta* Orde 4.

Dari model matematik yang telah didapat, maka selanjutnya dikembangkan kedalam suatu model komputer dengan menggunakan *Visual Basic for Microsoft Excel 2007*. Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap model komputer yang telah

dikembangkan terhadap berbagai parameter model dan parameter lapangan berdasarkan data hipotetis. Dari keluaran (*output*) yang dihasilkan kemudian divalidasi dengan membandingkannya terhadap teori.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari 5 bab. Pada bab pertama adalah bab pendahuluan. Pada bab ini diuraikan mengenai latar belakang penulisan, maksud dan tujuan, ruang lingkup masalah, serta metodologi dan sistematika penulisan yang dilakukan.

Bab kedua adalah persamaan umum aliran air tanah. Pada bab ini diuraikan teori dasar air tanah pada lapisan tak jenuh air, dan kurva karakteristik lapisan tak jenuh air. Pada bab ini juga dijelaskan penurunan persamaan kekekalan massa hingga mendapatkan persamaan dasar (*governing equation*) laju aliran air tanah yang digunakan beserta parameter-parameternya.

Bab ketiga adalah pengembangan model aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air. Pada bab ini dibahas penyelesaian persamaan dasar aliran air tanah dengan menggunakan metode beda hingga. Setelah itu adalah menyelesaikan persamaan tersebut secara *explicit* dengan menggunakan metode *Runge Kutta* orde 4, serta pengembangan model matematik menjadi suatu model komputer.

Bab keempat adalah pengujian dan penerapan model program aliran tanah pada komputer. Pada bab ini berisi penerapan model yang telah dilakukan berdasarkan parameter-parameter yang mempengaruhinya dan juga dilakukan pengujian terhadap parameter-parameter model dan lapangan.

Bab kelima adalah kesimpulan dan saran. Pada bab ini dibahas kesimpulan dari pembahasan yang dilakukan secara menyeluruh dalam karya tulis ini, dan juga berisi tentang saran untuk pengembangan model lebih lanjut.

BAB 2

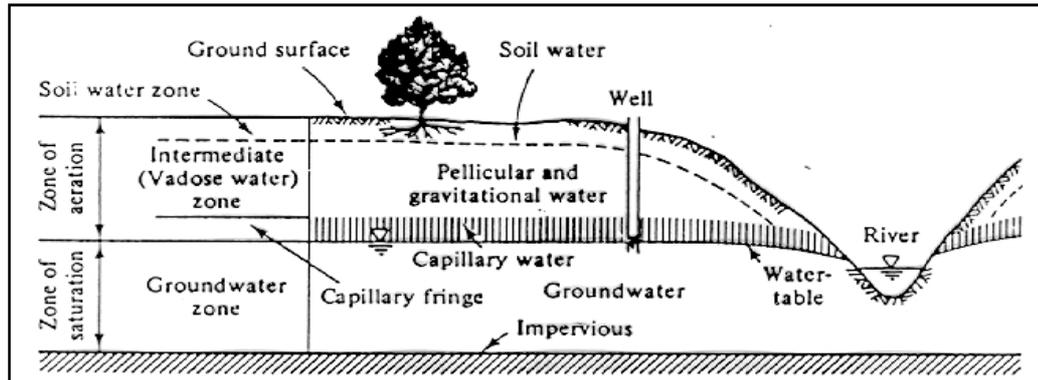
PERSAMAAN UMUM ALIRAN AIR TANAH PADA LAPISAN TAK JENUH AIR

2.1. Air Tanah

Air tanah adalah istilah yang digunakan untuk seluruh air yang berada di bawah permukaan tanah. Susunan tanah yang mengandung air dapat dibagi secara vertikal menjadi beberapa zona atau lapisan horisontal. Pembagian zona tersebut didasarkan atas banyaknya air yang mengisi ruang pori pada lapisan tanah. Secara umum lapisan tanah yang seluruh ruang porinya terisi oleh air disebut sebagai zona saturasi (*zone of saturation*) atau yang lebih dikenal dengan lapisan jenuh air (*saturated zone*), sedangkan lapisan tanah yang ruang porinya terisi oleh air dan gas (udara dan uap air) disebut sebagai zona aerasi (*aeration zone*) atau yang dikenal dengan lapisan tak jenuh air (*unsaturated zone*).

Skema distribusi dari air tanah pada lapisan tanah homogen ditunjukkan oleh gambar 2.1. Lapisan jenuh air pada gambar tersebut terletak di atas lapisan kedap air dan sebagai batas atasnya adalah muka air tanah. Sedangkan lapisan tak jenuh air yang terletak di atas muka air tanah dan di bawah permukaan tanah, dapat dibagi lagi menjadi tiga bagian, yaitu zona air permukaan (*soil water zone*) atau juga disebut zone perakaran yaitu daerah penyerapan akar, zona pertengahan (*intermediate zone* atau *vadose water zone*), serta zona kapiler (*capillary fringe*).

Dalam bahasa sehari-hari maupun para ahli hidrologi, air tanah biasanya merujuk kepada air yang berada pada lapisan jenuh air. Hal ini dikarenakan jumlah air tanah yang berada pada lapisan ini relatif cukup banyak dan sering dimanfaatkan bagi kepentingan umat manusia dibandingkan dengan air tanah yang berada pada lapisan tak jenuh air. Namun demikian, pemahaman dan kemampuan menghitung dan memperkirakan aliran air pada lapisan tak jenuh air juga merupakan faktor yang tidak dapat diabaikan begitu saja. Perilaku aliran pada lapisan tak jenuh air juga dapat memberikan pengaruh pada lapisan jenuh air. Hal ini bisa dilihat salah satunya pada proses infiltrasi dimana air dari permukaan tanah mengalir ke bawah menuju lapisan jenuh air melalui lapisan tak jenuh air (Bear, 1979).



Gambar 2.1 Distribusi air di bawah permukaan tanah

(Sumber : Bear, 1979)

2.2. Lapisan Tak Jenuh Air (*Unsaturated Zone*)

Suatu lapisan tanah disebut berada dalam kondisi tak jenuh air apabila hanya sebagian pori-pori tanahnya yang terisi oleh air dan sisanya terisi udara atau fluida lainnya. Umumnya tanah yang dekat dengan permukaan tanah merupakan tanah yang tidak jenuh air. Lapisan tak jenuh air ini kadang disebut pula sebagai *zone of aeration* atau *vadose zone* (Freeze & Cherry, 1979).

Menurut Bear (1979), terdapat dua variabel yang umum digunakan untuk mendefinisikan jumlah air relatif pada waktu tertentu di sekitar suatu titik pada medium berpori, yaitu :

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_T}, 0 \leq \theta_w \leq \phi \quad (2.2.1)$$

dan

$$S_w = \frac{V_w}{V_v}; 0 \leq S_w \leq 1 \quad (2.2.2)$$

dimana:

- θ_w = kadar air;
- S_w = saturasi air;
- V_w = volume air pada tanah;
- V_T = volume total tanah;
- V_v = volume pori/rongga pada tanah.

Kedua definisi di atas dihubungkan satu sama lain dengan rumus :

$$\theta_w = \phi \cdot S_w \quad (2.2.3)$$

dimana ϕ adalah porositas tanah yang ditinjau.

Untuk lapisan tak jenuh air besarnya $\theta_w < \phi$, karena tidak keseluruhan pori-pori tanah terisi oleh air, dimana:

$$\phi = \frac{V_V}{V_T} \quad (2.2.4).$$

Pada saat terjadi kontak antara udara dengan air, terdapat tekanan yang diskontinu sepanjang permukaan kontak tersebut, yang diakibatkan oleh adanya *interfacial tension*. Besaran dari perbedaan tekanan tersebut tergantung pada *interface curvature* yang dipengaruhi oleh saturasi. Perbedaan tekanan ini disebut *capillary pressure* (p_c), dimana :

$$p_c = p_a - p_w \quad (2.2.5)$$

dimana:

p_a = tekanan udara;

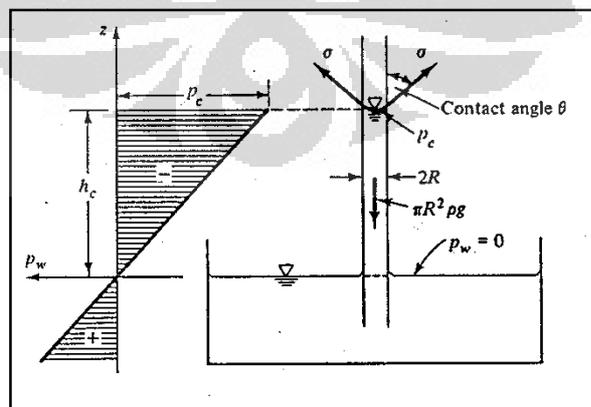
p_w = tekanan air / fluida.

Secara umum p_c adalah perbedaan tekanan antara sisi basah dan sisi kering pada pertemuan antara dua fluida.

Bila diasumsikan udara yang terdapat pada rongga tanah berada pada tekanan atmosfer, maka tekanan air pada rongga tersebut, yaitu p_w lebih kecil dari tekanan atmosfer, sehingga :

$$p_c = -p_w \quad (2.2.6).$$

Ilustrasi eksperimental dari p_c dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Pipa kapiler

(Sumber : Bear, 1979)

Sehingga pada lapisan tak jenuh air besarnya tinggi pizometrik (*piezometric head*) memenuhi rumus :

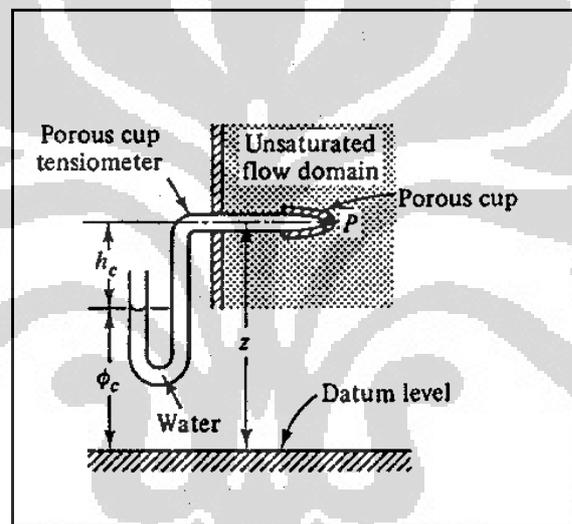
$$\phi_c = z + \frac{p_w}{\gamma_w} = z - \frac{p_c}{\gamma_w} = z - h_c \quad (2.2.7)$$

dimana :

- ϕ_c = *piezometric head*;
- z = *elevation head*;
- h_c = *capillary pressure head*;
- h_w = *pressure head*;

$p_c < 0$; $p_a = 0$ (tekanan atmosfer)

ilustrasi persamaan (2.2.7) dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram definisi untuk ϕ_c
(Sumber : Bear, 1979)

Apabila diasumsikan udara pada rongga tanah berada pada tekanan atmosfer ($p_a = 0$), maka menurut Freeze and Cherry (1979), pada dasarnya perbedaan antara aliran jenuh air dengan aliran tak jenuh air adalah sebagai berikut:

- ❖ untuk aliran jenuh air : $h_w > 0$, $\theta_w = \phi$ dan $K = K_s$;
- ❖ untuk aliran tak jenuh air : $h_w < 0$, $\theta_w = \theta_w(h_w)$ dan $K = K(h_w)$;

dimana :

- h_w = tinggi tekanan air;
- K_s = *saturated conductivity*;

$K(h_w)$ = nilai *hydraulic conductivity* yang merupakan fungsi dari h_w .

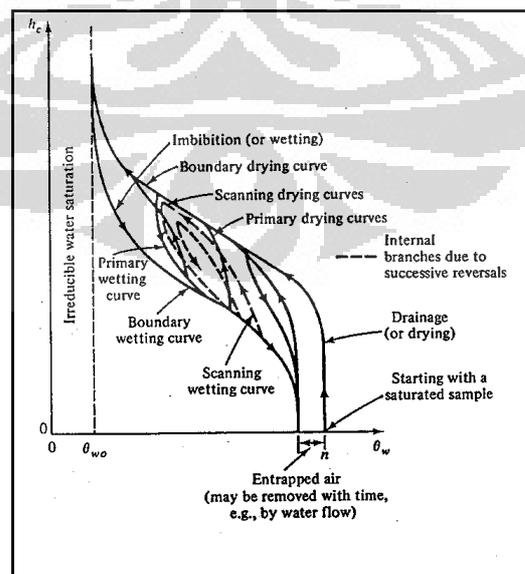
Sehingga ciri-ciri lapisan tak jenuh air adalah (Freeze & Cherry, 1979) :

1. terletak di atas muka air tanah dan di atas daerah *capillary fringe*,
capillary fringe adalah suatu lapisan tanah dimana pori-porinya dalam keadaan jenuh dengan nilai $h_w < 0$;
2. pori-pori tanahnya hanya terisi sebagian oleh air, sehingga nilai kadar airnya (θ_w) lebih kecil dari nilai porositas tanah (ϕ);
3. besar tekanan air (p_w) lebih kecil dari tekanan atmosfer, dan nilai *pressure head* (h_w) lebih kecil dari nol;
4. *hydraulic conductivity* (K) dan kadar air (θ_w) keduanya merupakan fungsi dari tinggi tekanan air (h_w).

2.3. Characteristic Curve Sebagai Parameter Hidrolis Lapisan Tak Jenuh Air

Characteristic Curve merupakan kurva yang menunjukkan hubungan antara kadar air (θ_w) dengan capillary pressure head (h_c), dimana semakin besar kadar air maka nilai *capillary pressure head* menjadi semakin kecil.

Berdasarkan pengamatan eksperimental, hubungan antara $\theta_w - h_c$ bersifat *hysteretic*, dimana terjadi fenomena yang berbeda pada saat tanah mengering (*drying*) dengan pada saat menjadi basah (*wetting*) (Freeze and Cherry, 1979). Fenomena ini ditunjukkan pada gambar 2.4.



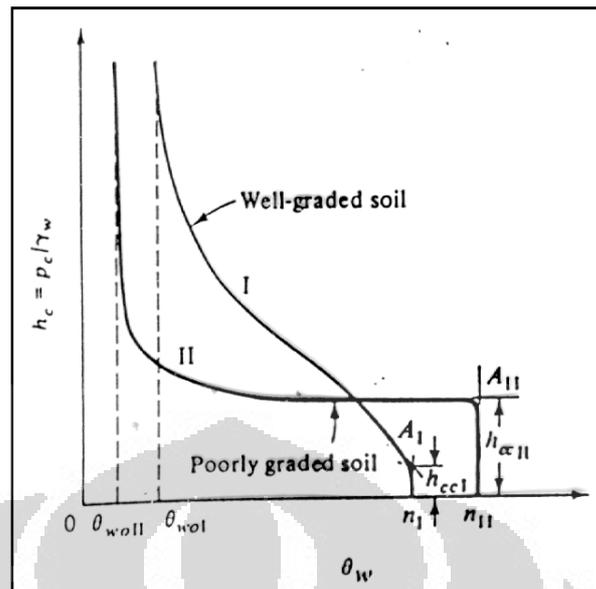
Gambar 2.4 Histeresis antara $\theta_w - h_c$ pada material berbutir kasar

(Sumber: Bear, 1979)

Menurut Freeze dan Cherry (1979), jika suatu sampel tanah dibuat jenuh pada suatu tinggi tekanan (*pressure head*) tertentu yang nilainya lebih besar dari nol dan kemudian tekanan tersebut diturunkan sedikit demi sedikit hingga mencapai nilai jauh lebih kecil dari tekanan atmosfer ($p_c \ll 0$), kadar air pada setiap tahap tersebut akan mengikuti pola *drying curve* (*drainage curve*). Jika air kemudian secara perlahan-lahan ditambahkan pada sampel tanah kering, tinggi tekanan akan kembali ke nilai semula dengan mengikuti pola *wetting curve* (*imbibition*), dalam hal ini eksperimen dilakukan secara *upward imbibition* sehingga tercapai keadaan keseimbangan statis (*static equilibrium*) dan diperoleh grafik seperti pada gambar 2.4. Garis di dalam kedua pola tersebut disebut sebagai *scanning curve*, yang menunjukkan bahwa nilai θ_w dan h_c akan mengikuti pola tersebut apabila tanah hanya sebagian dibasahi kemudian dikeringkan, atau sebaliknya.

Menurut Bear (1979), pada umumnya pori-pori tanah memiliki ukuran yang berbeda, sehingga pada saat air dialirkan pori-pori tersebut tidak akan kosong secara bersamaan pada tekanan tarik (*suction pressure*) yang sama. Pori-pori yang lebih besar akan menjadi kosong pada tekanan tarik yang kecil, sedangkan pori-pori yang lebih kecil akan menjadi kosong pada tekanan tarik yang besar. Tekanan tarik (*suction pressure*) ini diakibatkan oleh adanya tekanan kapiler (*capillary pressure*).

Gambar 2.5 menunjukkan kurva antara tinggi tekanan kapiler (*capillary pressure head*, h_c) dan kadar air (θ_w) selama proses pengaliran air (*drainage*). Kurva ini menurut Bear (1979) disebut sebagai *moisture characteristic curve* atau *retention curve*, yang menunjukkan bagaimana air dipertahankan tetap berada pada tanah akibat gaya kapiler yang berlawanan dengan gaya gravitasi, dan titik A dianggap sebagai *critical capillary head* (h_{cc}), dimana air tidak akan meninggalkan tanah sampai tercapainya tekanan kapiler (p_c) yang ekuivalen dengan nilai h_{cc} tersebut. Tekanan pada saat titik kritis tersebut disebut sebagai *bubbling pressure* atau *air-entry pressure* (p_e), yaitu besarnya nilai *capillary pressure* (p_c) pada saat terjadinya inter-koneksi antara air dengan pori-pori tanah (*water pore pressure interconnection*). Sehingga pada nilai kritis h_{cc} tersebut air yang terdapat pada pori-pori tanah yang lebih besar mulai mengalir.



Gambar 2.5 Retention Curve

(Sumber: Bear, 1979)

Bentuk dari *retention curve* tergantung pada distribusi ukuran pori (*pore size distribution*) dan bentuk pori pada media berpori (Bear, 1979). Jumlah air yang tetap berada pada pori bahkan setelah tercapainya nilai *capillary pressure* (p_c) yang sangat tinggi disebut sebagai kadar air residual (θ_r), atau di dalam istilah saturasi disebut sebagai saturasi residual (S_r) (Bear, 1979).

Menurut Freeze dan Cherry (1979), kadar air θ_w memiliki nilai sama dengan porositas (ϕ) untuk semua nilai $p_c > 0$ pada tanah berbutir kasar. Untuk tanah berbutir halus, nilai $\theta_w = \phi$ untuk $p_c > p_e$, dimana p_e adalah *air-entry pressure*. Sedangkan nilai *hydraulic conductivity* (K) untuk tanah tak jenuh air meningkat seiring dengan peningkatan kadar air.

2.4. Hukum Kekekalan Massa

Hukum kekekalan massa menjelaskan bahwa apabila perkalian massa yang terjadi di dalam suatu unit volume media pori per satuan waktu ditambah dengan selisih massa yang keluar atau masuk unit tersebut melalui permukaannya adalah sama dengan nol. Suatu unit volume media pori sangat dibutuhkan untuk menurunkan persamaan aliran tanah secara mikroskopis dan unit ini biasa disebut elemen *control volume* (Freeze & Cherry, 1979). Sebagai elemen *control volume*

diambil sebidang kecil media pori berbentuk kubus atau biasa disebut sebagai *box control* seperti dapat dilihat pada gambar 2.6. Pada *box control* ini seolah-olah dialirkan atau dilalukan sejumlah air yang nantinya diharapkan memenuhi Hukum Kekekalan Massa. Secara matematis hukum kekekalan massa dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{D}{Dt} \int_{cv} \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{scs} \rho \bar{n} \bar{v} dA \quad (2.4.1)$$

dimana:

ρ = massa jenis fluida;

V = volume;

\bar{v} = kecepatan vektor fluida;

\bar{n} = vektor satuan;

A = luas permukaan unit.

Sesuai dengan definisi diatas, maka ruas kiri pada persamaan (2.4.1) adalah sama dengan nol dan setelah dilakukan pengintegralan maka persamaan (2.4.1) menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho V = -\rho \bar{v} \bar{n} A \quad (2.4.2).$$

Pada lapisan tak jenuh air, pori-pori tanah tidak seluruhnya berisi air sehingga volume yang dipakai adalah volume air tanah pada pori bukan volume pori secara keseluruhan. Sehingga berdasarkan persamaan (2.2.1), volume air tanah pada elemen control volume adalah sebagai berikut:

$$V_w = \theta_w dV_t \quad (2.4.3).$$

Sehingga dengan mensubstitusi persamaan (2.4.3) ke ruas kiri persamaan (2.4.2), maka akan didapat persamaan sebagai berikut:

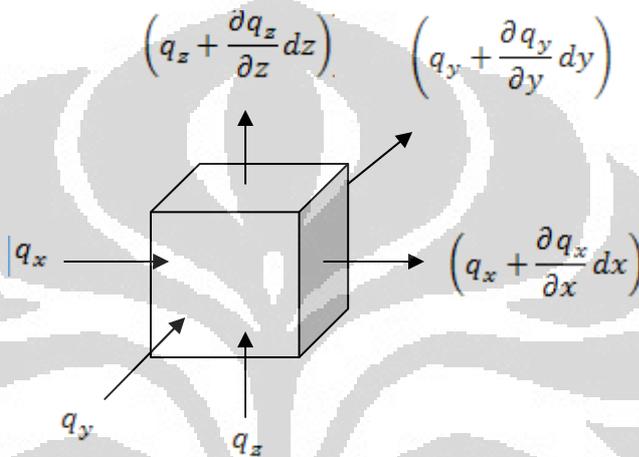
$$\frac{\partial}{\partial t} \rho V = \frac{\partial}{\partial t} \rho \theta_w dV_t \quad (2.4.4).$$

Seperti yang sudah diijelaskan sebelumnya, maka aliran air tanah yang masuk dan keluar didefinisikan sebagai flux (q), yaitu:

$$\bar{v} = q = \frac{Q}{A}$$

Sehingga untuk persamaan (2.4.2) akan berubah menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \theta_w dV_t = -\rho q \bar{n} A \quad (2.4.5).$$



Gambar 2.6 Elemen *Control Volume*
(Sumber: Freeze & Cherry, 1979)

Pada elemen *control volume*, jumlah massa (dalam hal ini disebut *flux*) air tanah yang masuk akan seimbang dengan jumlah *flux* air tanah yang keluar dari permukaan elemen *control volume* dikurangi besarnya perubahan *flux* yang di dalam *box control* tersebut. Selanjutnya dengan melihat pada elemen *control volume* seperti pada gambar, maka persamaan (2.4.5) menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho \theta_w dV_t &= -\rho \left[q_x - \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) \right] dydz \\ &\quad -\rho \left[q_y - \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) \right] dydz \\ &\quad -\rho \left[q_z - \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \right] dxdy \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho \theta_w dV_t &= -\rho \left\{ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right\} dxdydz \end{aligned} \quad (2.4.6).$$

Karena $dx dy dz = dV_t$, maka persamaan (2.4.6) menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \theta_w dV_t = -\rho \left\{ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right\} dV_t \quad (2.4.7).$$

Apabila kedua ruas dibagi dengan dV_t , maka persamaan (2.4.7) akan menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \theta_w = -\rho \left\{ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right\} \quad (2.4.8).$$

Secara matematis, persamaan (2.4.8) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \theta_w + \text{div}(\rho \cdot q) = 0 \quad (2.4.9).$$

2.5. Persamaan Aliran Air Tanah pada Lapisan Tak Jenuh Air

Dengan mengasumsikan tidak ada penambahan atau pengurangan di dalam daerah *unsaturated flow* (antara lain akibat akar pohon), persamaan kekekalan massa untuk fase air menurut Bear (1979) adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \theta_w) + \text{div}(\rho_w q) = 0 \quad (2.5.1)$$

karena $\theta_w = \phi \cdot S_w$, maka:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_w) + \text{div}(\rho_w q) = 0 \quad (2.5.2)$$

dimana q adalah *specific discharge* dari air dan dianggap hanya terdapat pada aliran air.

Jika air diasumsikan *incompressible* pada daerah tekanan dalam *unsaturated flow*, dan diasumsikan tidak ada perubahan ρ_w akibat zat-zat solid terlarut, maka persamaanbya menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi S_w) + \text{div}(q) = 0 \quad (2.5.3).$$

Untuk medium yang *non-deformable* (tidak mengalami perubahan bentuk), maka ϕ sama dengan konstan, sehingga persamaan (2.5.3) dapat direduksi menjadi:

$$\phi \frac{\partial}{\partial t}(S_w) + \text{div}(q) = 0 \quad (2.5.4).$$

Untuk medium yang *deformable* atau mengalami konsolidasi, maka nilai ϕ harus diperhitungkan dan nilai q didefinisikan sebagai pergerakan butiran.

Untuk medium berpori yang *isotropic* dan fluida yang homogen, $\rho_w =$ konstan, sehingga diperoleh:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_w) + \text{div}(K(\theta_w)\text{grad}\phi) = 0 \quad (2.5.5)$$

dimana: $\phi = z - h_c$ dan $h_c = \frac{\rho_c}{\gamma_w} = -\frac{\rho_w}{\gamma_w}$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_w) + \text{div}(K(\theta_w)\text{grad} h_c) - \frac{\partial}{\partial z}[K(\theta_w)] = 0 \quad (2.5.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\theta_w) + \frac{\partial}{\partial x}\left[K(\theta_w)\frac{\partial h_c}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K(\theta_w)\frac{\partial h_c}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta_w)\frac{\partial h_c}{\partial z}\right] \\ - \frac{\partial}{\partial z}[K(\theta_w)] = 0 \end{aligned} \quad (2.5.7)$$

karena infiltrasi dianggap sebagai aliran 2 dimensi searah sumbu x dan z , sehingga persamaan (2.5.7) dapat direduksi menjadi sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_w) + \frac{\partial}{\partial x}\left[K(\theta_w)\frac{\partial h_c}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta_w)\frac{\partial h_c}{\partial z}\right] - \frac{\partial}{\partial z}[K(\theta_w)] = 0 \quad (2.5.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_w) + \frac{\partial}{\partial x}\left[K(\theta_w)\frac{\partial h_c}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta_w)\left(\frac{\partial h_c}{\partial z} - 1\right)\right] = 0 \quad (2.5.9)$$

karena K merupakan fungsi dari θ_w dan θ_w merupakan fungsi dari h_c , maka K merupakan fungsi dari h_c , sehingga persamaan (2.5.9) menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t}\theta_w(h_c) + \frac{\partial}{\partial x}\left[K(h_c)\frac{\partial h_c}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h_c)\left(\frac{\partial h_c}{\partial z} - 1\right)\right] = 0 \quad (2.5.10)$$

atau

$$\emptyset \frac{\partial}{\partial t} S(h_c) + \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_c) \left(\frac{\partial h_c}{\partial z} - 1 \right) \right] = 0 \quad (2.5.11)$$

persamaan (2.5.11) merupakan *governing equation* formulasi **Richards** (Freezy & Cherry, 1979) dalam perhitungan aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air pada aliran 2 dimensi. Dimana besarnya *hydraulic conductivity* $K(h_c) = K_s K_r(h_c)$, dengan K_s adalah *saturated conductivity*, dan K_r adalah *conductivity relative* yang merupakan fungsi dari h_c , atau bisa dinyatakan menjadi sebagai berikut:

$$K_r(h_c) = \sqrt{S_e(h_c)} \left[1 - \left(1 - S_e(h_c)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2 \quad (2.5.12)$$

dimana:

$$S_e(h_c) = [1 + (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n} - 1} \quad (2.5.13)$$

n dan α merupakan konstanta yang menentukan kelengkungan grafik *retention curve* dan letak dari *critical capillary head* (h_{cc}).

Sedangkan besarnya saturasi dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$S(h_c) = S_r + (1 - S_r) S_e(h_c) \quad (2.5.14)$$

dimana :

S_r = saturasi residual;

S_e = saturasi efektif.

Persamaan (2.5.12), (2.5.13) dan (2.5.14) dikenal sebagai persamaan **Van Genuchten** (1980).

BAB 3
PENGEMBANGAN MODEL ALIRAN AIR TANAH
PADA LAPISAN TAK JENUH AIR

3.1. Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*)

Formulasi aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air seperti pada persamaan (2.5.11) merupakan persamaan turunan parsial. Penyelesaian suatu persamaan turunan parsial pada dasarnya dapat dilakukan melalui dua cara, yaitu secara analitik dan numerik. Oleh karena untuk menyelesaikan secara analitik sulit sekali, maka digunakanlah suatu metode numerik, yang pada karya tulis ini menggunakan metode beda hingga (*finite difference method*).

Representasi metode beda hingga untuk suatu turunan parsial didasarkan pada deret Taylor dan dapat dibagi menjadi tiga cara, yaitu *forward difference*, *backward difference*, dan *central difference*. Dimana pada karya tulis ini, penulis menggunakan cara *forward difference*, yaitu:

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)\Delta x$$
$$f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{\Delta x}$$

Metode beda hingga mendiskritkan jarak dan waktu dalam beberapa interval. Sehingga untuk menyelesaikan formulasi Richards, lapisan air tanah dimodelkan sebagai nodal-nodal, dimana masing-masing nodal memiliki nilai *hydraulic conductivity* (K).

Pergerakan air tanah (dalam hal ini *flux* air tanah) baik ke arah vertikal maupun horizontal direpresentasikan sebagai q_d ($q_{downstream}$) yaitu *flux* yang berada pada suatu kotak diskrit dan q_u ($q_{upstream}$) yaitu *flux* yang berada pada kotak diskrit berikutnya.

Untuk membuat persamaan dasar aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air menjadi suatu bentuk numerik, maka persamaan (2.5.11) terlebih dahulu kita ubah menjadi:

$$\emptyset \frac{\partial}{\partial t} S(h_c) = - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_c) \left(\frac{\partial h_c}{\partial z} - 1 \right) \right] \right\} \quad (3.1.1)$$

Untuk menyelesaikan ruas kiri persamaan (3.1.1) maka digunakan deret Taylor dengan cara *forward difference*, sehingga persamaannya menjadi:

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} S(h_c) = \phi \frac{S(h_c)^{t+1} - S(h_c)^t}{\Delta t} \quad (3.1.2)$$

Persamaan pada ruas kanan, selanjutnya dimisalkan sebagai Ft , sehingga menjadi sebagai berikut:

$$Ft = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h_c) \left(\frac{\partial h_c}{\partial z} - 1 \right) \right] \right\} \quad (3.1.3)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.1.2) dan (3.1.3) ke persamaan (3.1.1), maka persamaan (3.1.1) menjadi:

$$\begin{aligned} \phi \frac{S(h_c)^{t+1} - S(h_c)^t}{\Delta t} &= -Ft \\ S(h_c)^{t+1} &= S(h_c)^t - \frac{Ft}{\phi} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (3.1.4)$$

Nilai Ft itu sendiri adalah dapat dilihat pada persamaan di bawah ini, dengan memasukan nilai *conductivity relative* $K_R(h_c)$ dengan menggunakan persamaan (2.5.12), maka nilai Ft pada persamaan (3.1.3) menjadi:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \left[K_S \sqrt{S_e(h_c)} \left[1 - \left(1 - S_e(h_c) \frac{n-1}{n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2 \frac{\partial h_c}{\partial x} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[K_S \sqrt{S_e(h_c)} \left[1 - \left(1 - S_e(h_c) \frac{n-1}{n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2 \left(\frac{\partial h_c}{\partial z} - 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

Dengan besarnya saturasi $S_e(h_c)$ dihitung dengan menggunakan persamaan (2.5.13), sehingga persamaan (3.1.5) menjadi:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \left[K_S \sqrt{[1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}}} \left[1 - \left(1 - \left([1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2 \frac{\partial h_c}{\partial x} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[K_S \sqrt{[1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}}} \left[1 - \left(1 - \left([1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2 \left(\frac{\partial h_c}{\partial z} - 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (3.1.6)$$

Dimana persamaan tersebut adalah *flux* (q) yang merupakan fungsi terhadap h_c , sehingga persamaan (3.1.6) dapat pula ditulis menjadi sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial x} [q_x(h_c)] + \frac{\partial}{\partial z} [q_z(h_c)] \quad (3.1.7)$$

dimana:

$$q_x(h_c) = K_S \sqrt{[1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \left[1 - \left(1 - \left([1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2} \frac{\partial h_c}{\partial x} \quad (3.1.8)$$

$$q_z(h_c) = K_S \sqrt{[1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \left[1 - \left(1 - \left([1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2} \left(\frac{\partial h_c}{\partial z} - 1 \right) \quad (3.1.9)$$

Selanjutnya dengan menggunakan *forward difference*, maka persamaan (3.1.7) menjadi:

$$\frac{q_{ux}^t - q_{dx}^t}{\Delta x} + \frac{q_{uz}^t - q_{dz}^t}{\Delta z} \quad (3.1.10)$$

dimana:

$$q_{dx}^t = K_S \sqrt{[1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \left[1 - \left(1 - \left([1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2} \frac{[h_c]_{i,j}^t - [h_c]_{i-1,j}^t}{\Delta x} \quad (3.1.11)$$

$$q_{ux}^t = K_S \sqrt{[1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \left[1 - \left(1 - \left([1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2} \frac{[h_c]_{i+1,j}^t - [h_c]_{i,j}^t}{\Delta x} \quad (3.1.12)$$

$$q_{dz}^t = K_S \sqrt{[1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}}} \left[1 - \left(1 - \left([1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2$$

$$\frac{[h_c]_{i,j}^t - [h_c]_{i,j-1}^t}{\Delta z}$$
(3.1.13)

$$q_{uz}^t = K_S \sqrt{[1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}}} \left[1 - \left(1 - \left([1 - (\alpha h_c)^n]^{\frac{1}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right]^2$$

$$\frac{[h_c]_{i,j+1}^t - [h_c]_{i,j}^t}{\Delta z}$$
(3.1.14)

3.2. Metode *Runge-Kutta*

Metode *Runge-Kutta* adalah suatu metode numerik yang merupakan bagian dari *explicit method* untuk menyelesaikan suatu persamaan differensial. Metode *Runge-Kutta* mempunyai rumus umum sebagai berikut:

$$y_{i+1} = y_i + \phi h$$
(3.2.1)

dimana $\phi = \text{slope/}$ kemiringan (atau disebut *increment function*). Metode *Euler* adalah orde pertama *Runge-Kutta* dengan $\phi = f(t_i, y_i)$. Sebagai tambahan, metode *Heun* (tanpa iterasi korektor) merupakan orde dua dari *Runge-Katta* (Chapra and Canale, 1988).

Kebanyakan metode *Runge-Katta* yang digunakan adalah orde empat yang memiliki bentuk:

$$y_{i+1} = c_i + \left[\frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] h$$
(3.2.2)

dimana:

$$k_1 = f(t_i, y_i)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1\right)$$

$$k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_2\right)$$

$$k_4 = f(t_i + h, y_i + hk_3)$$

Fungsi tersebut untuk menyelesaikan persamaan diferensial yang memuat nilai t dan y , yaitu:

$$f(t, y) = \frac{dy}{dt}(t, y) \quad (3.2.3)$$

Orde empat *Runge-Kutta* sama dengan pendekatan *Heun* dalam estimasi *slope* berkali-kali yang dikembangkan pada perubahan rata-rata *slope* dalam interval. (Steven C. Chapra, *Surface Water-Quality Modeling*, 1997)

Selanjutnya dengan melihat persamaan (3.1.8) yaitu:

$$S(hc)^{t+1} = S(hc)^t - \frac{Ft}{\phi} \cdot \Delta t$$

maka untuk nodal (i,j) , persamaan (3.1.8) akan menjadi:

$$S(hc)^{t+\Delta t}_{(i,j)} = S(hc)^t_{(i,j)} - \frac{Ft}{\phi} \cdot \Delta t \quad (3.2.4).$$

Persamaan diatas selanjutnya diselesaikan dengan menggunakan metode *Runge-Kutta* orde empat, dengan perincian rumus sebagai berikut:

$$f_{i,j}^t \Delta t = \left[\frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] \Delta t \quad (3.2.5)$$

dimana:

$$\begin{aligned} k_1 &= f_{i,j}^t(t, [h_c]_{i,j}^t); \\ k_2 &= f_{i,j}^t\left(t + \frac{1}{2}\Delta t, [h_c]_{i,j}^t + \frac{1}{2}k_1\Delta t\right); \\ k_3 &= f_{i,j}^t\left(t + \frac{1}{2}\Delta t, [h_c]_{i,j}^t + \frac{1}{2}k_2\Delta t\right); \\ k_4 &= f_{i,j}^t(t + \Delta t, [h_c]_{i,j}^t + k_2\Delta t). \end{aligned}$$

3.2.1. Kondisi Batas Metode *Runge Kutta*

Dalam menggunakan metode ini, penulis menggunakan batasan-batasan sebagai berikut:

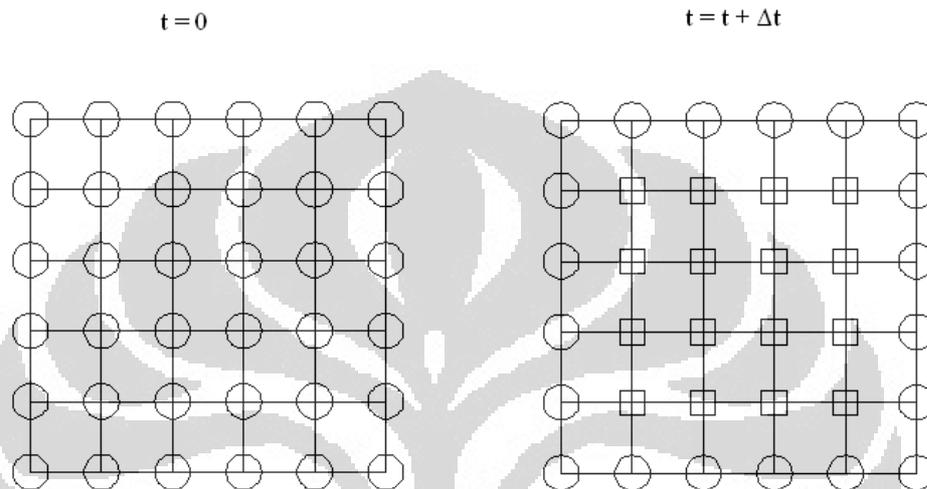
1. sebagai kondisi awal (*initial condition*) diasumsikan nilai-nilai *capillary pressure head* pada $t = 0$ diasumsikan pada saat kering, nilai ini juga dapat disesuaikan dengan kondisi yang ada di lapangan;
2. adanya suatu nilai *capillary pressure head* yang konstan sepanjang waktu yang terletak disekeliling profil yang sedang ditinjau dan berfungsi sebagai

kondisi batas (*boundary condition*) agar sistem persamaan dapat dicari solusi terbaiknya.

3.2.2. Penyelesaian Sistem Persamaan Linear

Pemodelan tanah dalam bentuk nodal tersebut, dideskripsikan pada gambar

3.1. Pemodelan ini digunakan untuk mengetahui h_c pada saat $t+\Delta t$.



Gambar 3.1 Pemodelan Lapisan Tanah untuk Formulasi Numerik

Kiri: kondisi awal; Kanan: kondisi batas

Berdasarkan gambar 3.1, maka nilai saturasi pada *boundary condition* mempunyai nilai yang sama pada setiap t . Besarnya saturasi untuk nodal yang lain nantinya pada setiap t , didapat dengan menggunakan persamaan (3.2.4).

Langkah awal penyelesaian sistem persamaan ini adalah dengan memasukkan nilai h_c awal pada persamaan (2.5.14) dan (3.1.3) sehingga akan mendapatkan besaran saturasi dan flux pada saat $t = 0$. Setelah memasukkan nilai h_c , maka persamaan ini diselesaikan dengan menggunakan persamaan (3.1.4) yang selanjutnya diselesaikan dengan menggunakan metode *Runge Kutta* untuk mencari besarnya saturasi pada saat t berikutnya.

Nilai h_c pada saat t berikutnya untuk iterasi pertama, didapat dengan mensubstitusi persamaan (2.5.13) dan (2.5.14) untuk mencari nilai h_c :

$$S(hc) = S_r + (1 - S_r)S_e(hc)$$

$$S_e(hc) = \frac{S(hc) - S_r}{1 - S_r}$$

$$[1 + (\alpha \cdot hc)^n]^{\frac{1}{n}-1} = \frac{S(hc) - S_r}{1 - S_r}$$

$$hc = \frac{\left[\left(\frac{S(hc) - S_r}{1 - S_r} \right)^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha}$$

(3.2.6)

Proses perhitungan untuk termin waktu berikutnya dimulai dengan menggunakan nilai h_c yang dihasilkan oleh termin waktu Δt yang pertama, lalu mencari besarnya saturasi dan *flux* yang selanjutnya diselesaikan dengan menggunakan metode *Runge Kutta* untuk mencari besarnya saturasi untuk termin waktu berikutnya. Proses perhitungan akan dihentikan apabila total waktu termin waktu yang dihitung melebihi total waktu maksimum (T_{max}).

3.3. Pengembangan Model Matematis ke Dalam Model Komputer

Dari hasil pengembangan model numerik yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, maka dibuatlah suatu model komputer untuk mempermudah pengoperasian perhitungan serta pengaplikasiannya. Penulisan algoritma persamaan matematik yang digunakan ke dalam program komputer adalah dengan menggunakan *Visual Basic for Microsoft Excel 2007*. Model komputer ini kemudian disebut sebagai **Program Aliran Skema Runge Kutta** yang dapat dijalankan menggunakan hardware dengan *processor* Pentium 4 dengan *hard disk* sebesar 80 GB dan RAM sebesar 512 MB.

Berikut ini akan diberikan contoh masukan data parameter untuk menggunakan program komputer yang telah dibuat (**Program Aliran Air Tanah**), yang akan memberikan gambaran bagaimana program komputer tersebut dapat mensimulasikan hasil dari model yang telah dikembangkan. Contoh masukan dari data parameter dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut.

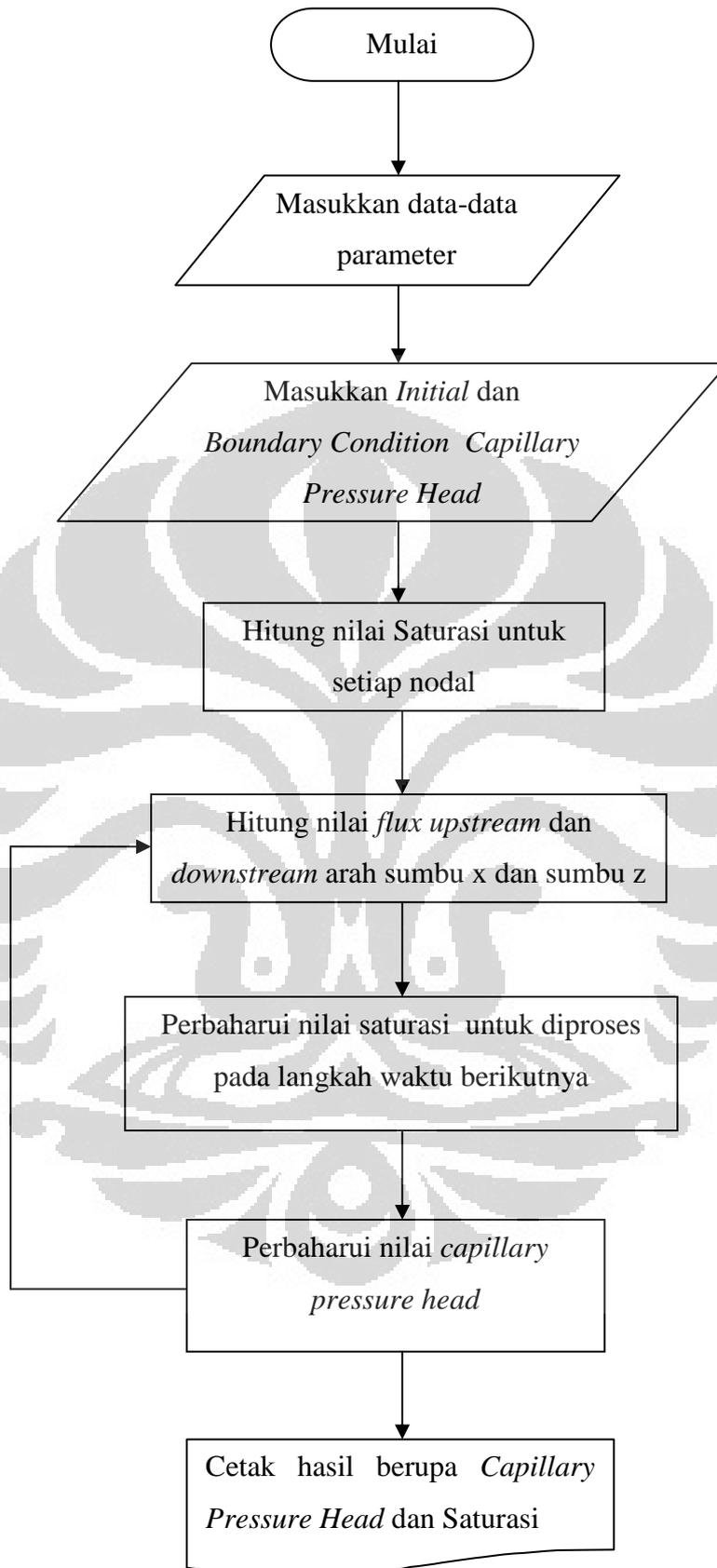
PROGAM ALIRAN SKEMA RUNGE KUTTA												
INPUT DATA PARAMETER												
Sr	0,2											
a	0,025											
n	4											
pi	0,55											
Tmax	2000 menit											
nT	400											
initial condition												
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
boundary condition												
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
10	100										100	
20	100										100	
30	100										100	
40	100										100	
50	100										100	
60	100										100	
70	100										100	
80	100										100	
90	100										100	
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
saturated conductivity (cm/menit)												
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
10	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
30	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
40	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02	
50	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02	
60	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02	
70	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
80	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
90	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	

Gambar 3.2. Contoh Masukan (*input*) Data

Program Aliran Skema Runge Kutta ini mempunyai data masukan (*input*) berupa data-data parameter untuk menghasilkan keluaran (*output*) berupa nilai *capillary pressure head* dan saturasi dalam ruang dan waktu yang ditempuh. Parameter-parameter yang digunakan sebagai data masukan dalam program model aliran air tanah ke lapisan tak jenuh air dari suatu badan air permukaan adalah sebagai berikut :

- 1) T_{max} ; merupakan parameter waktu maksimum yang berfungsi untuk menghentikan proses perhitungan bila jumlah kumulatif interval waktu telah mencapai nilai maksimum . Satuannya adalah menit.
- 2) nT ; merupakan parameter yang membuat harga selisih waktu (Δt) untuk setiap *looping* perhitungan menjadi semakin besar untuk *looping* berikutnya.
- 3) n ; merupakan parameter yang menunjukkan besarnya konstanta kelengkungan grafik saturasi terhadap kedalaman tanah yang ditinjau.
- 4) a ; merupakan parameter berupa konstanta yang menentukan letak kedalaman jenuh pada grafik saturasi terhadap kedalaman tanah yang ditinjau.
- 5) K_s ; merupakan parameter konduktivitas jenuh (*saturated conductivity*) dalam satuan cm/menit.
- 6) S_r ; adalah singkatan dari saturasi residual, merupakan parameter yang menunjukkan jumlah air yang tetap berada pada pori-pori tanah pada *capillary pressure* yang sangat tinggi.
- 7) P_i ; merupakan parameter yang menunjukkan perbandingan antara volume pori dengan volume total tanah yang ditinjau (porositas tanah).

Proses yang akan dilakukan selanjutnya adalah melakukan simulasi pada model. Tahap-tahap yang dilakukan pada proses simulasi dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Alur Model Aliran Air Tanah pada Lapisan Tak Jenuh Air

3.4. Langkah-langkah Pemakaian Model

Langkah-langkah yang harus dilakukan oleh pemakai dalam menggunakan dan menjalankan **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini adalah :

- 1) menentukan kondisi daerah yang dimodelkan, berupa koordinat-koordinat pada sumbu z yang merepresentasikan kedalaman profil tanah, koordinat-koordinat pada sumbu x yang merepresentasikan jarak memanjang profil tanah, nilai *capillary pressure head* awal sebagai *initial condition*, *boundary condition*, dan nilai *saturated conductivity* untuk setiap lapisan tanah tersebut;
- 2) memasukkan nilai data-data parameter yang dibutuhkan sesuai kolom yang tersedia pada *sheet "input"*, dimana setiap data parameter harus mempunyai satu nilai;
- 3) setelah semua data-data parameter dilengkapi, kemudian kita menjalankan suatu *interface* yang disebut sebagai kotak dialog (*dialog box*) agar data yang telah tercantum langsung dibaca oleh program. Bentuk kotak dialog yang terdapat pada sheet "Dialog1" tersebut adalah sebagai berikut :

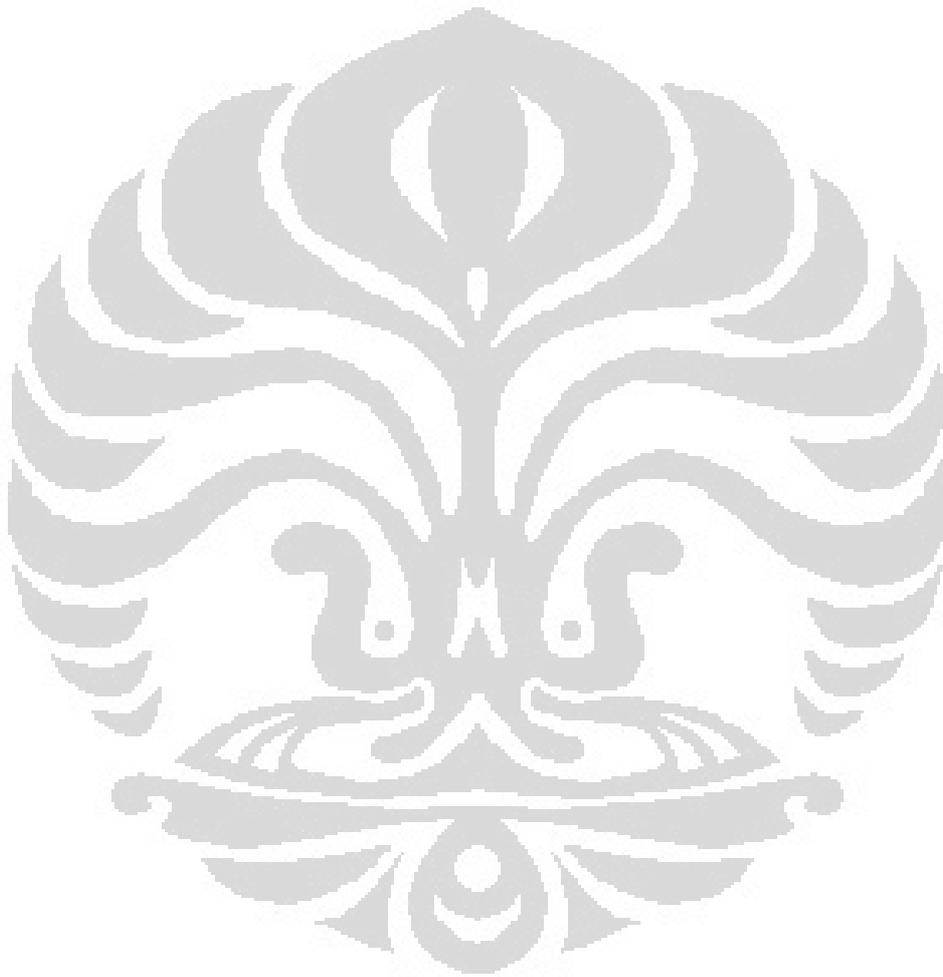
PARAMETER	input!\$C\$3:\$C\$8	KS	input!\$B\$40:\$L\$50
KOORDINAT X	input!\$B\$11:\$L\$11	KOORDINAT Z	input!\$A\$12:\$A\$22
KONDISI AWAL	input!\$B\$12:\$L\$22	KONDISI BATAS	input!\$B\$26:\$L\$36
OUTPUT	\$A\$1	OK Cancel	

Gambar 3.4. Kotak Dialog

Kotak dialog ini timbul apabila kita meminta Program Aliran Tanah ini dijalankan,

- 4) Setelah menyetujui kotak dialog yang menampilkan data parameter yang telah kita buat, maka komputasi akan segera dilakukan. Lamanya komputasi tergantung oleh besar kecilnya nilai jumlah *loop* komputasi (nT) yang dimasukkan dan banyaknya iterasi yang dilakukan untuk menghasilkan keluaran (*output*)

- 5) Karena dalam modul program telah ditentukan tempat keluaran hasil komputasi, sehingga hasil keluaran tersebut langsung dicetak pada lembar yang telah ditentukan, dalam hal ini adalah pada *sheet* "output" atau jika diperlukan dapat dicetak pada *sheet* lain. Hasil keluaran ini kemudian dibuat dalam bentuk grafik saturasi terhadap kedalaman atau grafik saturasi terhadap waktu.



BAB 4

PENGUJIAN DAN PENERAPAN MODEL PROGRAM ALIRAN AIR TANAH PADA KOMPUTER

4.1. Umum

Pada pembahasan sebelumnya telah dikembangkan suatu model komputer aliran air tanah, maka dari model komputer tersebut selanjutnya dilakukan simulasi dengan cara menjalankan program yang ada berdasarkan parameter yang telah ditentukan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui apakah model komputer yang telah dibuat berfungsi dengan baik. Respon yang dikeluarkan oleh program pada pengujian haruslah sesuai dengan teori yang ada. Pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. pengujian model komputer terhadap perhitungan manual;
2. pengujian terhadap kemampuan mensimulasi parameter model:
 - a. pengujian insensitivitas model terhadap pemilihan nilai selisih jarak antar nodal pada arah sumbu x (Δx);
 - b. pengujian insensitivitas model terhadap pemilihan nilai selisih waktu untuk setiap kali putaran (*loop*) komputasi;
3. pengujian terhadap kemampuan mensimulasi parameter lapangan:
 - a. pengujian terhadap kemampuan mensimulasi pengaruh nilai *saturated conductivity*;
 - b. pengujian terhadap kemampuan mensimulasi pengaruh nilai saturasi residual;
 - c. pengujian terhadap kemampuan mensimulasi pengaruh nilai *n* dan *a*;
 - d. pengujian terhadap kemampuan mensimulasi pengaruh nilai porositas.

Setelah melakukan berbagai pengujian tersebut, maka dilakukan penerapan **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini dengan berbagai kondisi yang ada di lapangan. Proses yang dilakukan pada penerapan model komputer ini adalah proses infiltrasi dan proses *imbibition*. Proses infiltrasi adalah pergerakan air dari permukaan tanah menuju ke dalam tanah. Pengaplikasian peristiwa

infiltrasi dalam program ini adalah misalnya dengan membuat suatu profil tanah dengan sebagai kondisi awal merupakan tanah kering. Sebagai kondisi batas pada sekeliling profil tanah dibuat tanah dalam kondisi kering kecuali pada bagian atas profil yang merupakan tanah jenuh sehingga seakan-akan terjadi hujan pada bagian atas profil dan terjadi aliran air dari permukaan tanah ke dalam tanah. Pada proses ini pada bagian atas nodal untuk berbagai jarak dan waktu, nilai saturasinya adalah sama dengan 1. Sedangkan nilai saturasi pada sekeliling profil yang lain pada berbagai t adalah mendekati nilai saturasi residualnya.

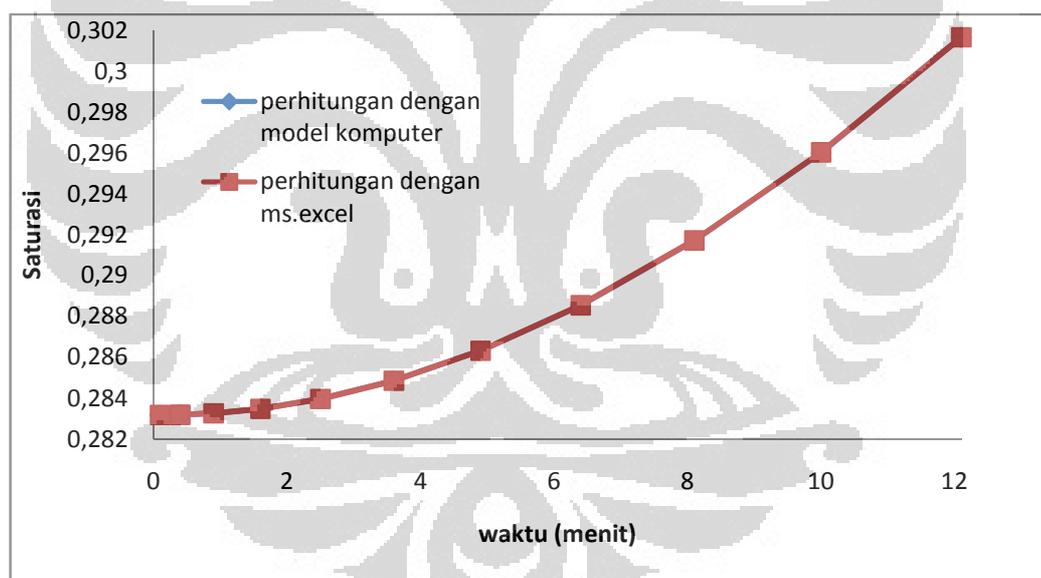
Proses *imbibition* adalah naiknya air tanah dari daerah jenuh air menuju daerah tak jenuh air. Naiknya air tanah di dalam pori tanah disebabkan oleh adanya tekanan kapiler yang menghisap air tanah menuju ke atas. Pengaplikasian peristiwa *imbibition* dalam program ini adalah misalnya dengan membuat suatu profil tanah dengan sebagai kondisi awal merupakan tanah kering. Sebagai kondisi batas pada sekeliling profil tanah dibuat tanah dalam kondisi kering kecuali pada bagian bawah profil yang merupakan tanah jenuh sehingga seakan-akan terdapat daerah jenuh air dan muka air tanah pada bagian bawah profil dan terjadi aliran air dari permukaan tanah ke dalam tanah. Pada proses ini pada bagian bawah nodal untuk berbagai jarak dan waktu, nilai saturasinya adalah sama dengan 1. Sedangkan nilai saturasi pada sekeliling profil yang lain pada berbagai t adalah mendekati nilai saturasi residualnya.

Satu hal yang perlu penulis sampaikan adalah bahwa untuk memudahkan penulisan pada saat pembuatan modelisasi persamaan aliran pada program ini maka nilai tekanan kapiler yang seharusnya negatif dibuat menjadi positif. Oleh karena itu pada program ini, aliran air tanah akan terjadi apabila terdapat perbedaan tinggi tekanan kapiler dari daerah dengan tinggi tekanan kapiler yang lebih kecil menuju daerah yang tinggi tekanan kapilernya lebih besar.

4.2. Pengujian Model Komputer terhadap Perhitungan Manual

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah *output* yang dihasilkan pada program telah sesuai dengan perhitungan manual yang dilakukan atau tidak. Apabila hasil yang dihasilkan pada model komputer telah sesuai dengan perhitungan manual, maka

model komputer ini telah siap untuk digunakan pada pengamatan-pengamatan selanjutnya, akan tetapi apabila output yang dihasilkan tidak sesuai maka perlu dilakukan pengecekan kembali pada program yang telah dibuat. Pengamatan dilakukan pada titik koordinat nodal (10 ; 10) yaitu jarak 10 cm kearah horizontal dan kedalaman 10 cm kearah vertikal. Pengamatan dilakukan dengan waktu perhitungan maksimum selama 10 menit dengan jumlah putaran *loop* komputasi sebesar 10 putaran dengan nilai *saturated conductivity* pada seluruh profil sebesar 0,06 cm/menit. Sebagai kondisi awal profil tanah yang ditinjau dibuat dalam keadaan kering yaitu dengan memasukkan nilai $hc = 75$ cm diseluruh nodal. Kemudian sebagai kondisi batas diberi nilai $hc = 75$ cm disekeliling profil kecuali pada bagian bawah profil dimana diberi nilai $hc = 0$ cm. Masukan (*input*) data dapat dilihat pada lampiran, sedangkan perbandingan *output* yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1. Perbandingan Saturasi Perhitungan Model Komputer dengan Perhitungan *Microsoft Excel*.

Pada gambar 4.1 merupakan grafik saturasi terhadap kedalaman dengan waktu perhitungan maksimum selaman 10 menit. Pada grafik tersebut terdapat 2 buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap waktu pada perhitungan menggunakan model komputer;

2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap waktu pada perhitungan menggunakan *microsoft excel*.

Dari gambar tersebut memperlihatkan pada kurva 1 dan 2 berada pada posisi yang berhimpitan. Hal ini menunjukkan bahwa keluaran yang dihasilkan dengan menggunakan model komputer dan *microsoft excel* menghasilkan hasil yang hampir sama. Hal ini dapat dilihat pada nilai saturasi ketika $T = 10$ menit, perhitungan dengan menggunakan model komputer menghasilkan nilai saturasi sebesar 0,296038 sedangkan perhitungan dengan menggunakan *microsoft excel* menghasilkan nilai saturasi sebesar 0,29044. Selisih keluaran (*output*) yang dihasilkan dari perhitungan dengan model komputer dan *microsoft excel* sangat tipis, maka dengan demikian maka model komputer ini dapat digunakan pada pengujian aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air.

4.3. Pengujian Terhadap Pengaruh Kemampuan Mensimulasi Paramater Model

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah program yang telah dibuat memiliki karakteristik yang diinginkan, yaitu tidak sensitif terhadap perubahan paramater-parameter yang dapat divariasikan menurut keinginan pemodel. Untuk mengetahui sensitivitas program ini, maka dilakukan variasi nilai parameter yang akan diuji dan keluarannya akan disajikan dalam bentuk grafik. Parameter-parameter model yang akan divariasikan nilainya antara lain adalah:

- a. Δx , merupakan parameter yang menunjukkan selisih jarak antar nodal ke arah sumbu x ;
- b. nT , merupakan parameter yang menunjukkan perubahan selisih waktu untuk sekali putaran (*loop*) komputasi.

4.3.1. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Jarak Antar Nodal Pada Arah Sumbu X (Δx)

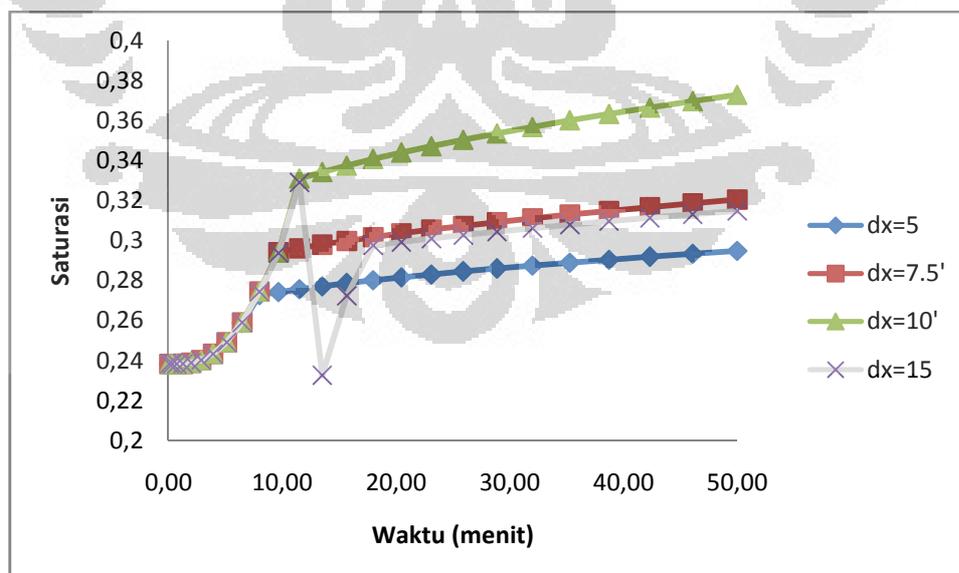
Pada program ini, parameter selisih jarak antar nodal pada arah sumbu x tidak dimasukkan secara langsung pada lembaran *input*, melainkan didapat dari pengurangan nilai koordinat antar nodal yang satu dengan nodal sebelumnya. Parameter ini sangat penting untuk ditinjau karena program ini harus bersifat tidak

sensitif terhadap perubahan Δx . Dengan kata lain, keluaran yang dihasilkan pada untuk satu titik nodal yang sama, haruslah menghasilkan nilai yang sama pula.

Pada pengujian ini akan ditinjau keluaran untuk kordinat nodal (30 ; 30), yaitu 30 cm pada arah horizontal dan 30 cm pada arah vertikal. Variasi nilai Δx adalah:

1. $\Delta x = 5$ cm;
2. $\Delta x = 7,5$ cm;
3. $\Delta x = 10$ cm;
4. $\Delta x = 15$ cm.

Masing-masing Δx ini dimasukkan sebagai *input* pada **Program Aliran Skema Runge Kutta** bersama parameter-parameter lainnya yang nilainya tetap sama untuk setiap pengujian Δx . Contoh masukan data pada pengujian Δx ini dapat dilihat pada lampiran. Sebagai kondisi awal diberi nilai $h_c = 75$ cm pada seluruh profil yang menandakan bahwa tanah dalam keadaan kering dan sebagai kondisi batas diberi nilai $h_c = 75$ cm disekeliling profil kecuali pada bagian bawah profil yang mempunyai nilai $h_c = 0$ cm yang menandakan bahwa tanah dalam kondisi jenuh. Hasil keluaran pada model komputer dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Grafik Hubungan Saturasi terhadap Waktu untuk berbagai variasi Δx .

Gambar 4.2 merupakan grafik yang menyatakan hubungan antara saturasi (pada sumbu vertikal) terhadap waktu (pada sumbu horizontal) pada koordinat nodal (30 ; 30) untuk $T_{Max} = 200$ menit. Grafik tersebut menunjukkan bahwa setiap kurva mempunyai bentuk kurva yang berbeda dan pola yang berbeda pula, kecuali grafik pada saat $t = 0$ hingga $t = 8$, dimana kurva pada posisi yang berhimpitan dengan nilai saturasi yang hampir sama. Bentuk grafik pada gambar ini tidak sesuai dengan teori yang ada, karena menghasilkan keluaran (*output*) yang berbeda-beda untuk setiap Δx , sehingga mengakibatkan program ini sangat sensitif untuk setiap perubahan Δx . Hasil yang dikeluarkan pada *output* ini dinamakan sebagai *logical error*, karena program bisa mengeluarkan *output* akan tetapi hasil keluarannya tidak sesuai dengan teori yang ada. Sehingga perlu dilakukan pengecekan kembali pada *code* yang dituliskan pada *visual basic* hingga menghasilkan *output* yang sesuai dengan teori yang ada.

4.3.2. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Waktu untuk Setiap Kali Putaran (*Loop*) Komputasi

Parameter nt merupakan parameter yang membuat harga selisih waktu (Δt) pada setiap *looping* menjadi semakin besar untuk *looping* berikutnya. Perubahan harga selisih waktu ini sangat diperlukan dalam perhitungan **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini, karena pada umumnya perubahan hasil perhitungan pada waktu-waktu awal berlangsung cepat dan semakin menuju kondisi *steady*, perubahan hasil perhitungan akan semakin lambat. Oleh karena itu perlu dengan lebih lengkap tahapan perubahan hasil pada saat awal dibandingkan dengan pada saat akhir perhitungan. Hubungan nT dengan Δt pada setiap putaran waktu dijelaskan oleh persamaan berikut:

$$\Delta t = \frac{T_{Max}}{nT^2} \times it^2 - T \quad (4.1)$$

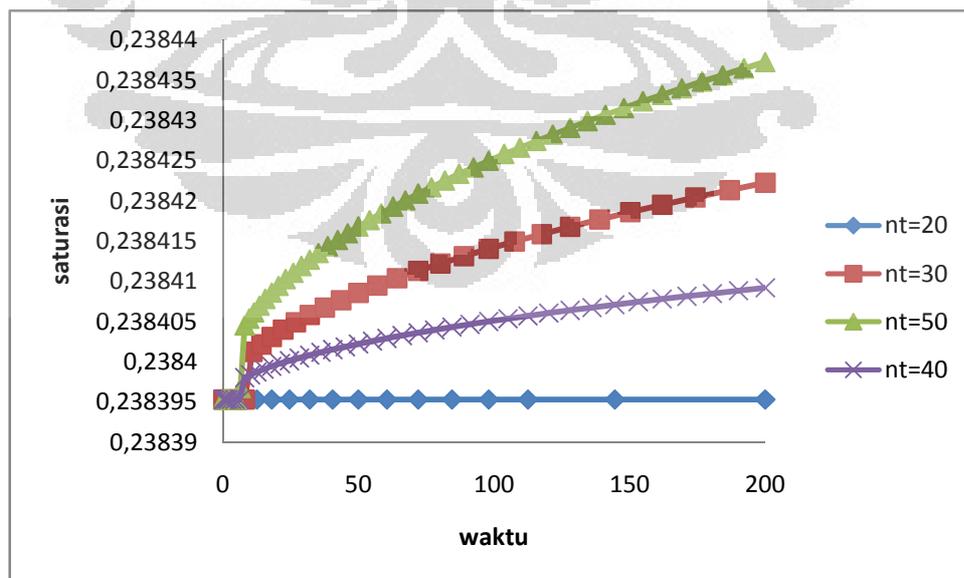
dimana:

- ◆ T_{Max} = waktu maksimum perhitungan;
- ◆ it = jumlah putaran perhitungan;
- ◆ T = total waktu perhitungan putaran sebelumnya.

Persamaan (4.1) menjelaskan tentang hubungan antara nT dan Δt yaitu apabila semakin besar nilai nT maka nilai Δt akan semakin kecil, sehingga tahapan perhitungan akan semakin lengkap. Parameter ini penting untuk ditinjau, karena program ini harus bersifat tidak sensitif terhadap perubahan Δt . Pada pengujian ini ditinjau keluaran untuk nodal (20;10), yaitu nodal pada jarak horizontal sebesar 20 cm dan pada kedalaman vertikal sebesar 10 cm. Variasi nT yang digunakan antara lain adalah sebagai berikut:

- $nT = 20$;
- $nT = 30$;
- $nT = 40$;
- $nT = 50$.

Masing-masing nT ini dimasukkan sebagai *input* pada **Program Aliran Skema Runge Kutta** bersama parameter-parameter lainnya yang nilainya tetap sama untuk setiap pengujian nT . Contoh masukan data pada pengujian nT ini dapat dilihat pada lampiran. Sebagai kondisi awal diberi nilai $hc = 75$ cm pada seluruh profil yang menunjukkan bahwa tanah dalam kondisi jenuh dan sebagai kondisi batas diberi nilai $hc = 75$ cm disekeliling profil kecuali pada bagian bawah profil diberi nilai $hc = 0$ cm yang menunjukkan bahwa tanah dalam kondisi jenuh. Hasil keluaran pada model komputer dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Grafik Hubungan Saturasi terhadap waktu untuk berbagai variasi nT .

Gambar 4.3 merupakan grafik yang menyatakan hubungan antara saturasi (pada sumbu vertikal) terhadap waktu (pada sumbu horizontal) pada koordinat nodal (30 ; 30) untuk $T_{Max} = 200$ menit. Grafik tersebut menunjukkan bahwa setiap kurva pada setiap tahapan waktu mempunyai bentuk kurva yang berbeda dan pola yang berbeda. Bentuk grafik pada gambar ini tidak sesuai dengan teori yang ada, karena menghasilkan keluaran (*output*) yang berbeda-beda untuk setiap perubahan nT . Hasil yang dikeluarkan pada *output* ini dinamakan sebagai *logical error* yaitu program bisa mengeluarkan *output* akan tetapi hasil keluarannya tidak sesuai dengan teori yang ada. Sehingga perlu dilakukan pengecekan kembali pada *code* yang dituliskan pada *visual basic* hingga menghasilkan *output* yang sesuai dengan teori yang ada.

4.4. Analisa Pengujian Terhadap Pengaruh Kemampuan Mensimulasi Paramater Model

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.2 dan 4.3 pada pengujian kemampuan mensimulasi paramater model menjelaskan program sangat sensitif terhadap perubahan parameter model, sehingga penulis memperkirakan bahwa terjadi kesalahan pada program yaitu bentuk kesalahan *logical error*. Kesalahan ini dapat mengeluarkan nilai pada program yang telah dibuat, akan tetapi nilai tersebut tidak sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Penyebab terjadinya kesalahan ini, kemungkinan disebabkan oleh kesalahan pada penulisan *code* pada *visual basic*, yaitu yang disebabkan program terus menjalankan prosesnya ketika nilai saturasi lebih dari 1 atau kurang dari saturasi residual, akan tetapi berjalannya program ini hanya pada nilai saturasi sedangkan pada tinggi tekanan kapiler tidak mengalami perubahan. Akibatnya bentuk grafik yang dihasilkan tidak sesuai dengan teori yang ada.

Kesalahan penulisan ini, juga disebabkan karena Metode *Runge Kutta* tidak bisa membaca perintah yang dilakukan oleh program, sehingga program mengeluarkan nilai yang tidak sesuai dengan kondisi yang terjadi di lapangan. Hal ini dibuktikan pada *output* yang dikeluarkan oleh program menghasilkan nilai saturasi yang lebih kecil dari saturasi residual dan lebih besar dari 1. Kesalahan ini disebabkan karena penggunaan selish waktu (Δt) yang tidak tepat pada saat

perhitungan. Selain itu, besarnya *flux* juga dipengaruhi oleh penggunaan nilai *saturated conductivity* (K_s) dan asumsi yang digunakan pada penggunaan tinggi tekanan kapiler (h_c). Penggunaan nilai *saturated conductivity* (K_s) yang terlalu besar dengan penggunaan nilai tinggi tekanan kapiler (h_c) yang terlalu kecil sebagai asumsi profil berada pada kondisi tidak jenuh serta penggunaan jumlah *loop* putaran yang terlalu kecil (nT) yang terlalu kecil akan mengakibatkan aliran tanah menjadi lebih cepat sehingga akan terjadi *error* pada program sebelum mencapai waktu perhitungan maksimum (T_{Max}) yang disebabkan nilai saturasi yang sudah lebih dari 1 atau kurang dari saturasi residual.

Berdasarkan hal tersebut, maka penulis melakukan pengecekan kembali terhadap *code* yang dituliskan pada *visual basic* serta melakukan pengujian kembali terhadap program. Pada pengujian yang dilakukan penulis mencoba melakukan beberapa variasi data parameter, yaitu variasi dari nilai tinggi tekanan kapiler (h_c), nilai *saturated conductivity* (K_s), dan waktu maksimum perhitungan (T_{Max}). Pada pengujian ini penentuan selisih waktu perhitungan masih tetap menggunakan persamaan (4.1) karena pada umumnya perubahan hasil perhitungan pada waktu-waktu awal berlangsung cepat dan semakin menuju kondisi *steady*, perubahan hasil perhitungan akan semakin lambat.

Pengujian pertama yang dilakukan adalah dengan merubah nilai tinggi tekanan kapiler (h_c) pada kondisi awal diseluruh nodal yang diasumsikan sebagai kondisi kering yang pada semula $h_c = 75$ menjadi $h_c = 1000$ cm. Sebagai kondisi batas sekeliling profil diberi nilai $h_c = 1000$ cm kecuali pada bagian atas profil diberikan nilai $h_c = 0$ cm yaitu diasumsikan terjadi proses infiltrasi. Pengamatan dilakukan pada titik (30 ; 30), yaitu pada jarak horizontal adalah 30 cm dan kedalaman 30 cm. Masukan data pada pengujian pertama ini dapat dilihat pada lampiran. Pengujian pertama ini dilakukan dengan waktu perhitungan maksimum selama 3000 menit dengan menggunakan nilai $K_s = 0,6$ cm/menit.

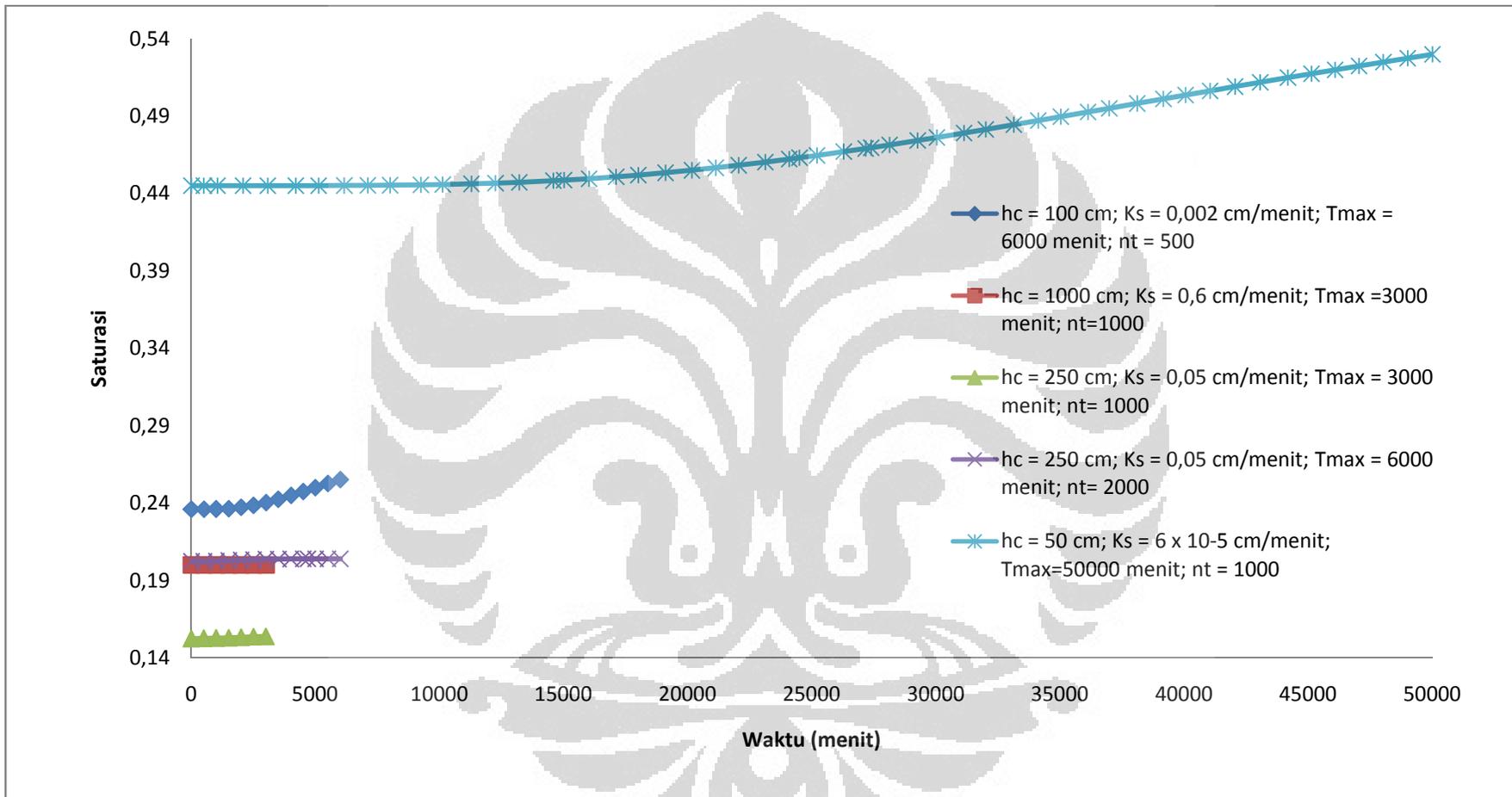
Pengujian kedua yang dilakukan adalah dengan mengasumsikan nilai tinggi tekanan kapiler (h_c) diseluruh titik nodal pada kondisi awal sebagai kondisi kering $h_c = 250$ cm. . Sebagai kondisi batas sekeliling profil diberi nilai $h_c = 250$ cm kecuali pada bagian atas profil diberikan nilai $h_c = 0$ cm yaitu diasumsikan terjadi proses infiltrasi. Pengamatan dilakukan pada titik (30 ; 30),

yaitu pada jarak horizontal adalah 30 cm dan kedalaman 30 cm. Masukan data pada pengujian kedua ini dapat dilihat pada lampiran. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan waktu perhitungan maksimum selama 3000 menit dengan menggunakan jumlah *loop* perhitungan sebesar 1000 putaran dan nilai $K_s = 0,05$ cm/menit.

Pengujian ketiga menggunakan parameter hc dan K_s yang sama dengan pengujian kedua akan tetapi dilakukan dengan memperpanjang waktu perhitungan maksimum menjadi 6000 menit dengan jumlah *loop* perhitungan selama 2000 putaran. Hal ini dilakukan karena pada percobaan sebelumnya dengan menggunakan perhitungan waktu maksimum selama 3000 menit belum menghasilkan grafik yang baik.

Pengujian keempat dilakukan dengan menggunakan nilai $hc = 100$ cm sebagai kondisi awal diseluruh nodal. Sebagai kondisi batas disekeliling profil diberi nilai $hc = 100$ cm kecuali pada bagian atas profil diberikan nilai $hc = 0$ cm yaitu diasumsikan terjadi hujan terus menerus selama waktu T . Pengamatan dilakukan pada titik (25 ; 25), yaitu pada jarak horizontal adalah 25 cm dan kedalaman 25 cm. Masukan data pada pengujian ketiga ini dapat dilihat pada lampiran. Pengamatan dilakukan dengan menggunakan waktu perhitungan maksimum selama 6000 menit dengan menggunakan jumlah *loop* perhitungan sebesar 500 putaran dan nilai $K_s = 0,002$ cm/menit.

Pengujian kelima dilakukan dengan kondisi awal nilai tinggi tekanan kapiler (hc) = 50 cm. Sebagai kondisi batas disekeliling profil diberi nilai $hc = 50$ cm, kecuali pada bagian atas profil diberikan nilai $hc = 0$ cm yaitu diasumsikan terjadi proses infiltrasi. Pengamatan dilakukan dengan waktu perhitungan maksimum (T_{max}) selama 50.000 menit dengan jumlah *loop* komputasi yang sama adalah 1000 putaran, penggunaan nilai $nT = 1000$ putaran karena pada pengamatan ini mempunyai waktu perhitungan maksimum yang sangat panjang sehingga dibutuhkan selisih waktu yang lebih kecil untuk menghindari terjadinya *error* pada program. Pengamatan dilakukan pada titik (25 ; 25), yaitu pada jarak horizontal adalah 25 cm dan kedalaman 25 cm. Contoh masukan data pada pengujian kelima ini dapat dilihat pada lampiran. Keluaran (*output*) yang dihasilkan pada setiap pengujian diperlihatkan pada grafik Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Saturasi untuk Berbagai Macam Pengujian

Pada gambar 4.4 menunjukkan perbandingan *output* yang dihasilkan pada setiap pengujian. Dimana berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada kurva 1 sampai dengan 5 memperlihatkan bahwa bentuk kurva yang cukup baik ditunjukkan pada kurva 1 dan kurva 5. Hal ini disebabkan karena pada kurva ini, nilai tinggi tekanan kapiler yang digunakan tidak terlalu besar yakni sebesar 50 cm dan 100 cm. Akan tetapi, penggunaan nilai tinggi tekanan kapiler yang seperti ini mengakibatkan nilai saturasi ketika $T = 0$ menit menjadi kurang mendekati nilai saturasi residualnya. Meskipun demikian, pada pengujian-pengujian selanjutnya penulis akan menggunakan nilai tinggi tekanan kapiler sebesar 50 cm sampai 100 cm, karena penggunaan nilai ini dapat lebih efisien untuk menghasilkan kurva yang cukup baik.

Pada kajian sebelumnya (Hendra Wijanoko, 1999) program aliran dapat berjalan menggunakan nilai $hc = 75$ cm dengan nilai $Ks = 0,6$ cm/menit dan $T_{max} = 3000$ menit seperti ditunjukkan pada Skripsi Pengembangan Model Aliran Air Tanah pada Lapisan Tak Jenuh Air Menggunakan Metode Beda Hingga (Hendra Wijanoko, 1999) gambar 3.3 halaman III-14. Akan tetapi dengan menggunakan data parameter yang sama, program aliran skema Runge Kutta ini tidak dapat menjalankan perhitungan hingga mencapai T maksimum, karena penggunaan nilai Ks yang terlalu besar mengakibatkan nilai saturasi pada suatu titik nodal pada saat T sudah sama dengan 1, sehingga akan terjadi *error* pada model komputer.

Pemilihan nilai hc ini juga disebabkan oleh pemilihan jumlah *loop* komputasi perhitungan. Pemilihan jumlah *loop* komputasi perhitungan (nT) sangat mempengaruhi terjadinya *error* atau tidaknya program. Pemilihan jumlah *loop* komputasi (nT) yang kecil akan mengakibatkan nilai selisih waktu (Δt) yang terlalu besar. Pemilihan nilai Δt yang terlalu besar ini, akan mengakibatkan tanah akan menjadi lebih cepat jenuh sebelum mencapai waktu perhitungan maksimum sehingga akan terjadi *error* pada model komputer. Namun begitu, penggunaan jumlah *loop* komputasi (nT) yang semakin besar, maka lamanya perhitungan pada model komputer akan semakin lama. Selain itu, jumlah *loop* komputasi (nT) maksimum yang dapat digunakan pada model komputer ini adalah 2980, sehingga apabila memasukkan jumlah *loop* komputasi (nT) lebih besar dari angka tersebut

maka program komputer akan berhenti melakukan perhitungan pada putaran ke 2980.

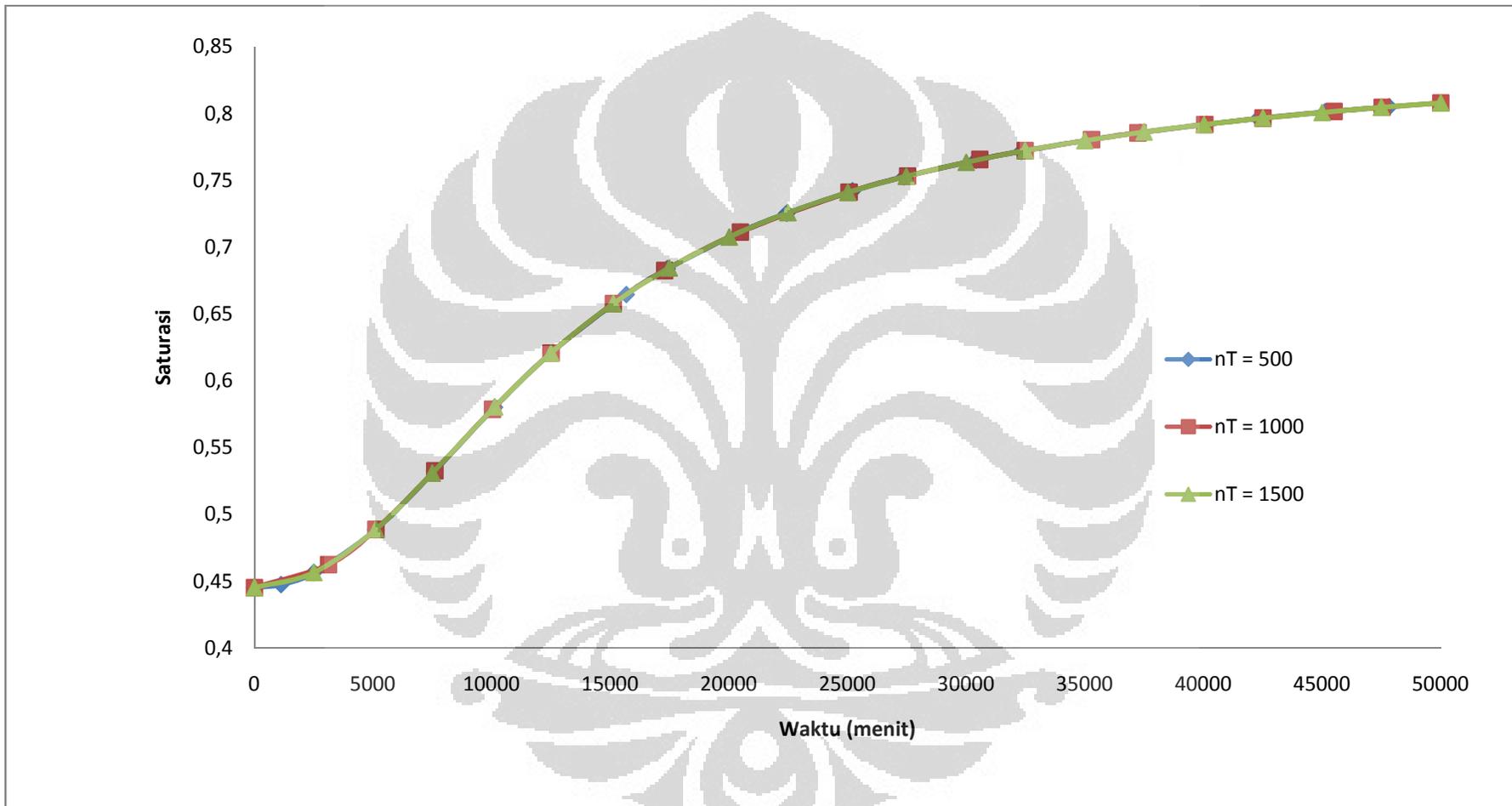
4.5. Pengujian Insensivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Waktu untuk Setiap Kali Putaran (*Loop*) Komputasi

Seperti sudah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya bahwa parameter nT merupakan parameter yang membuat harga selisih waktu (Δt) pada setiap *looping* menjadi semakin besar untuk *looping* berikutnya. Perubahan harga selisih waktu ini sangat diperlukan dalam perhitungan **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini, karena pada umumnya perubahan hasil perhitungan pada waktu-waktu awal berlangsung cepat dan semakin menuju kondisi *steady*, perubahan hasil perhitungan akan semakin lambat. Oleh karena itu, perlu dengan lebih lengkap tahapan perubahan hasil pada saat awal dibandingkan dengan pada saat akhir perhitungan. Hubungan nT dengan Δt pada setiap putaran waktu dijelaskan oleh persamaan dijelaskan pada persamaan (4.1).

Pada pengamatan kali ini ditinjau keluaran pada koordinat nodal (10 ; 10), yaitu pada jarak 10 cm dan kedalaman 10 cm. Variasi nT yang digunakan pada pengamatan ini antara lain adalah sebagai berikut:

- a. $nT = 500$;
- b. $nT = 1000$;
- c. $nT = 1500$.

Masing-masing nT ini dimasukkan sebagai input pada **Program Aliran Skema Runge Kutta** bersama parameter-parameter lainnya yang nilainya tetap sama untuk setiap pengujian nT . Contoh masukan data pada pengujian nT ini dapat dilihat pada lampiran. Sebagai kondisi awal diberi nilai $h_c = 50$ cm pada seluruh profil yang menunjukkan bahwa tanah dalam kondisi jenuh dan sebagai kondisi batas diberi nilai $h_c = 50$ cm disekeliling profil kecuali pada bagian atas profil diberi nilai $h_c = 0$ cm yang menunjukkan bahwa tanah dalam kondisi jenuh. Hasil keluaran (*output*) ditampilkan dalam bentuk grafik saturasi terhadap waktu pada gambar 4.5.



Gambar 4.5. Grafik Saturasi untuk Berbagai Nilai nT pada Nilai $hc = 50$ cm

Gambar 4.5 menunjukkan grafik saturasi terhadap waktu pada berbagai nT untuk $T_{Max} = 50.000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi. Pada pengujian ini memperlihatkan bahwa untuk berbagai variasi nilai nT , nilai saturasinya sama. Hal ini ditunjukkan oleh bentuk kurva yang berhimpitan. Sehingga menunjukkan bahwa **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini tidak sensitif untuk berbagai nilai jumlah putaran komputasi (nT), hanya saja dengan nilai $nT = 500$ program ini tidak menjalankan prosesnya hingga selesai dan sudah berhenti menjalankan prosesnya ketika $T = 47.824,199$ menit. Sehingga berdasarkan hal tersebut, maka pemilihan nilai jumlah putaran komputasi (nT) menjadi sangat penting dalam menjalankan program ini karena sangat mempengaruhi besarnya nilai selisih waktu (Δt). Dengan nilai Δt yang besar maka profil model tanah akan lebih cepat jenuh, sehingga program aliran akan lebih cepat jenuh. Pemilihan nilai jumlah putaran komputasi (nT) yang terlalu besar juga akan mengakibatkan durasi proses menjadi lebih lama.

Pada kajian sebelumnya (Hendra Wijanoko, 1999) dengan menggunakan metode *Newton Raphson*, bentuk kurva yang dihasilkan pada variasi jumlah putaran komputasi tidak berhimpitan, hal ini membuktikan bahwa penggunaan metode *Runge Kutta* orde 4 sebagai solusi numerik persamaan aliran air tanah menghasilkan keluaran (*output*) yang lebih stabil.

4.6. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Jarak Antar Nodal Pada Arah Sumbu X (Δx)

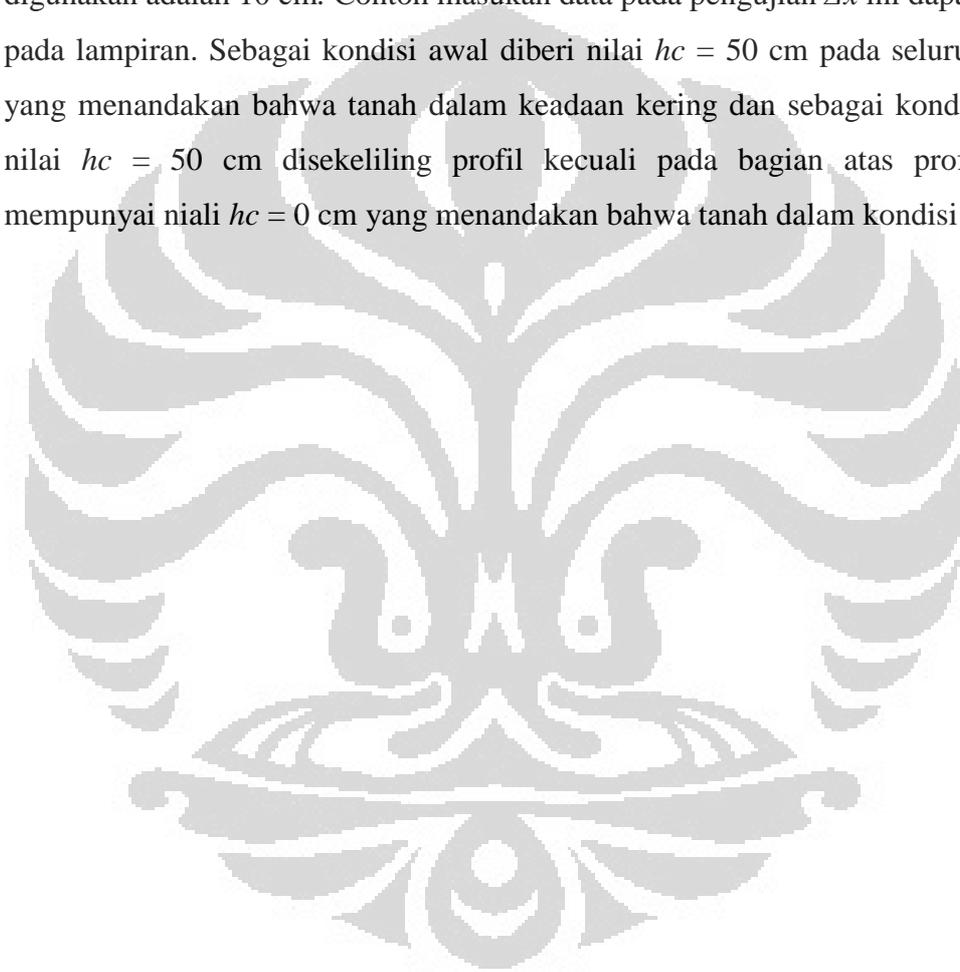
Pada program ini, parameter selisih jarak anatar nodal pada arah sumbu x tidak dimasukkan secara langsung pada lembar *input*, melainkan didapat dari pengurangan nilai koordinat antar nodal yang satu dengan nodal sebelumnya. Parameter ini sangat penting untuk ditinjau karena program ini harus bersifat tidak sensitif terhadap perubahan Δx . Dengan kata lain, keluaran yang dihasilkan pada untuk satu titik nodal yang sama, haruslah menghasilkan nilai yang sama pula.

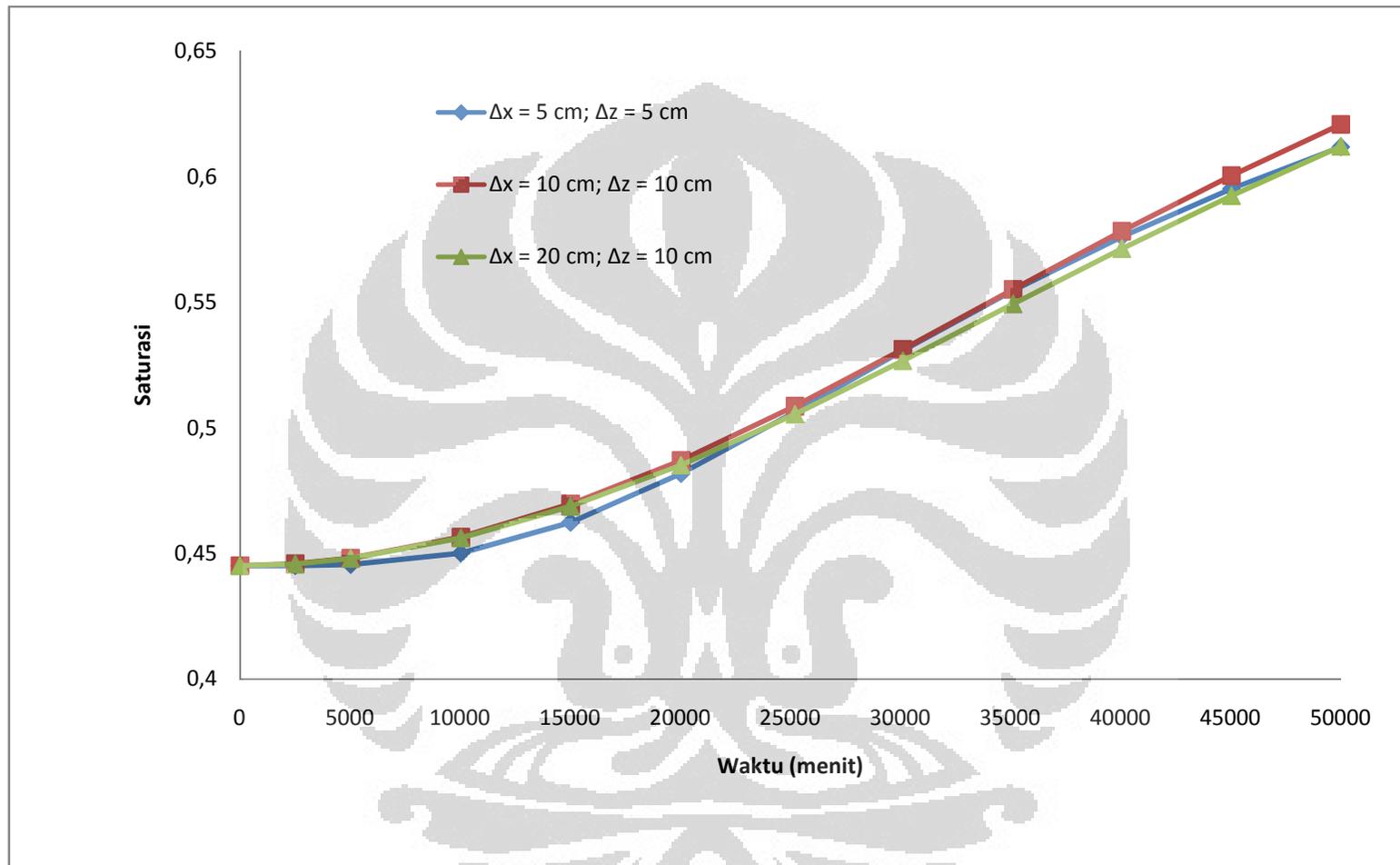
Pada pengujian ini akan ditinjau keluaran untuk koordinat nodal (20 ; 20), yaitu 20 cm pada arah horizontal dan 20 cm pada arah vertikal. Variasi nilai Δx pada pengamatan ini antara lain sebagai berikut

1. $\Delta x = 5$ cm;

2. $\Delta x = 10$ cm;
3. $\Delta x = 20$ cm.

Masing-masing Δx ini dimasukkan sebagai *input* pada **Program Aliran Skema Runge Kutta** bersama parameter-parameter lainnya yang nilainya tetap sama untuk setiap pengujian Δx , perbedaan parameter yang digunakan hanya pada Δz . Pada pengamatan dengan nilai $\Delta x = 5$ cm, nilai Δz yang digunakan adalah 5 cm, sedangkan pada pengamatan dengan nilai $\Delta x = 10$ cm dan 20 cm, Δz yang digunakan adalah 10 cm. Contoh masukan data pada pengujian Δx ini dapat dilihat pada lampiran. Sebagai kondisi awal diberi nilai $h_c = 50$ cm pada seluruh profil yang menandakan bahwa tanah dalam keadaan kering dan sebagai kondisi batas nilai $h_c = 50$ cm disekeliling profil kecuali pada bagian atas profil yang mempunyai nilai $h_c = 0$ cm yang menandakan bahwa tanah dalam kondisi jenuh.





Gambar 4.6. Grafik Saturasi untuk Berbagai Nilai Δx pada $h_c = 50$ cm

Pada gambar 4.6 menunjukkan grafik saturasi terhadap waktu pada berbagai selisih jarak (Δx) dengan T Maksimum = 50.000 menit. Pada pengujian ini memperlihatkan bahwa untuk berbagai nilai Δx dan Δz menghasilkan bentuk kurva saturasi terhadap waktu yang hampir sama, akan tetapi kurva tidak berada pada posisi yang berhimpitan. Hal ini kemungkinan disebabkan karena nilai Δz yang digunakan tidak sama. Namun begitu, terdapat 2 kurva yang berhimpitan pada saat waktu tertentu, seperti kurva 2 dan 3 yang berhimpitan dari $T = 0 - 25.000$ menit, setelah itu kurva 1 dan 2 yang berhimpitan hingga $T = 40.000$ menit dan kurva 1 dan 3 hingga $T = 50.000$. Sehingga dapat disimpulkan bahwa **Program Aliran Skema Runge Kutta** tidak sensitif terhadap berbagai perubahan selisih jarak pada arah sumbu x dan selisih kedalaman pada arah sumbu z .

4.7. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Parameter Lapangan

Pengujian ini dilakukan terhadap parameter-parameter yang dibutuhkan dalam menjalankan **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini dan nilainya tergantung pada kondisi lapangan. Kegunaan pengujian parameter lapangan adalah untuk mengetahui apakah program ini menghasilkan respon yang sesuai dengan teori terhadap masukan (*input*) yang diberikan.

Masing-masing parameter diuji dalam beberapa variasi nilai yang berbeda dimana nilai parameter-parameter lain (yang tidak diuji) mempunyai nilai yang tetap dan hasilnya akan disimulasikan dalam bentuk grafik berdasarkan keluaran (*output*) yang dihasilkan untuk tiap variasi parameter. Sehingga dari grafik yang ditampilkan dapat dilihat karakteristik dari tiap parameter yang diuji. Parameter-parameter yang akan diuji adalah sebagai berikut:

- a. K_s ; yaitu merupakan nilai yang menunjukkan besarnya *saturated conductivity* pada profil tanah yang ditinjau.
- b. S_r ; yaitu merupakan nilai yang menunjukkan jumlah air yang tetap berada pada pori-pori tanah bahkan *pressure* yang tinggi sekalipun.
- c. n dan a ; yaitu merupakan parameter yang berhubungan dengan kelengkungan grafik saturasi yang dihasilkan dan kedalaman jenuh yang terjadi;

- d. p_i ; yaitu merupakan nilai yang menunjukkan besarnya porositas tanah pada profil tanah yang ditinjau.

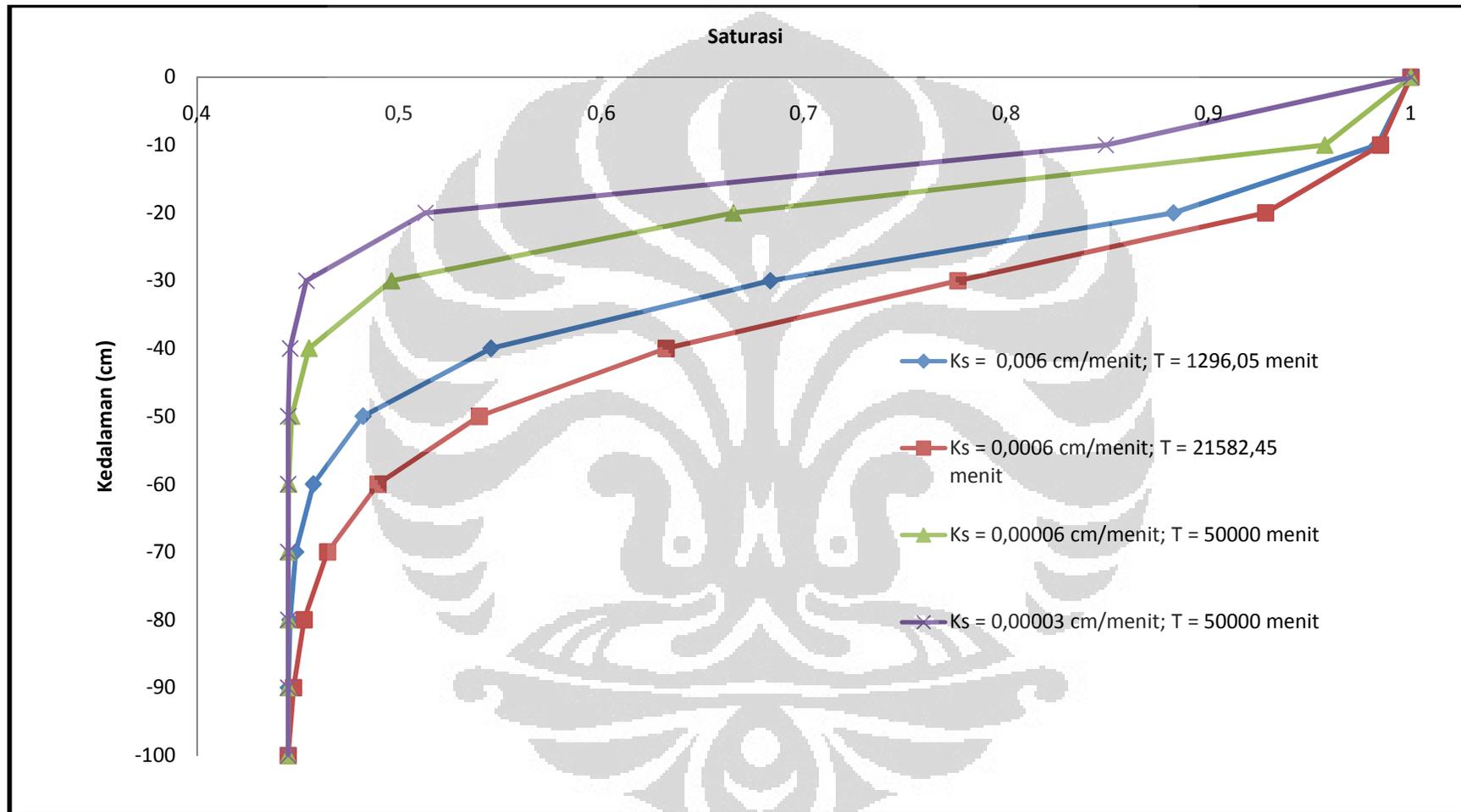
4.7.1. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai *Saturated Conductivity*

Saturated conductivity merupakan nilai *hydraulic conductivity* tanah yang berada pada keadaan jenuh. Nilai *hydraulic conductivity* tergantung dari karakteristik tanah, jenis fluida serta tingkat kejenuhan (saturasi) tanah tersebut, dimana apabila tanah semakin jenuh maka nilai *hydraulic conductivity* akan semakin besar.

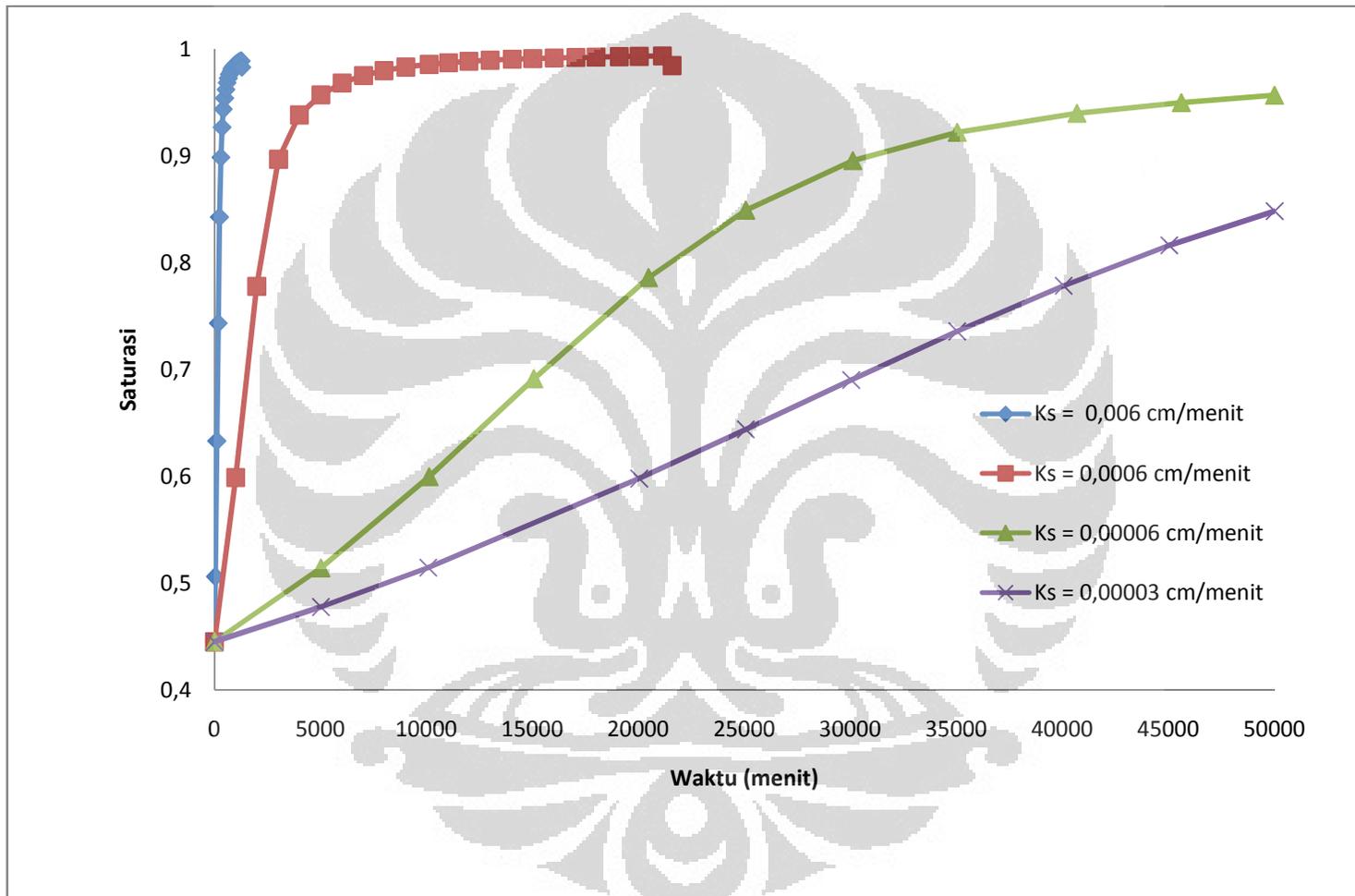
Pada **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini, nilai *saturated conductivity* yang dinotasikan sebagai K_s , merupakan parameter dimasukkan kedalam lembar *input* agar program ini dapat dijalankan. Pada pengujian ini, parameter nilai *saturated conductivity* yang diuji mempunyai 3 (tiga) nilai yang berbeda, sedangkan parameter lain nilainya tetap. Sehingga nantinya dapat dibandingkan dapat dibandingkan besarnya saturasi yang terjadi pada berbagai nilai saturasi untuk berbagai nilai *saturated conductivity* tersebut. Dimana berdasarkan teori yang ada, semakin besar nilai *saturated conductivity*, maka nilai saturasi akan semakin besar pula. Data-data parameter lain yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada lampiran. Pada kondisi awal, nilai $h_c = 50$ cm yang terletak diseluruh profil dengan sebagai kondisi batas nilai $h_c = 50$ cm yang terletak disekeliling profil kecuali pada bagian atas profil nilai $h_c = 0$ cm yang menandakan bahwa tanah berada dalam kondisi jenuh. Selisih jarak (Δx) dan kedalaman (Δz) yang digunakan pada pengujian ini adalah sebesar 10 cm. Besarnya nilai *saturated conductivity* yang diuji adalah sebagai berikut:

- a. $K_s = 0,006$ cm/menit;
- b. $K_s = 0,0006$ cm/menit;
- c. $K_s = 0,00006$ cm/menit;
- d. $K_s = 0,00003$ cm/menit.

Berdasarkan data tersebut, keluaran (*output*) disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 4.7 dan gambar 4.8.



Gambar 4.7. Grafik Saturasi terhadap Kedalaman pada Berbagai K_s



Gambar 4.8. Grafik Saturasi terhadap Waktu pada Berbagai K_s

Pada gambar 4.7 merupakan grafik saturasi terhadap kedalaman dengan waktu perhitungan maksimum selama 50.000 menit pada jarak 50 cm. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin besar nilai *saturated conductivity*, tanah akan mempunyai kedalaman jenuh yang semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori yang ada yaitu apabila semakin besar nilai *saturated conductivity*, maka nilai saturasi akan semakin besar pula. Sehingga pada pengujian ini dapat diambil kesimpulan bahwa dalam **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini, respon yang diberikan pada *output* sesuai dengan teori.

Pada gambar 4.8 merupakan grafik saturasi terhadap waktu dengan waktu perhitungan maksimum selama 50.000 menit. Gambar tersebut menunjukkan bahwa pemilihan nilai *saturated conductivity* sangat mempengaruhi berjalannya **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini hingga mencapai *T Max*. Penggunaan nilai *Ks* yang besar, akan mengakibatkan program akan berhenti menjalankan perhitungan, akan tetapi penggunaan nilai *Ks* yang terlalu kecil akan mengakibatkan waktu perhitungan maksimum menjadi lebih panjang.

4.7.2. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai Saturasi Residual

Saturasi residual adalah jumlah air yang tetap berada pada pori-pori tanah bahkan pada tekanan yang tinggi sekalipun, karena air yang berada pori-pori tersebut dipertahankan oleh gaya kapiler yang ada. Biasanya untuk mengeluarkan air dari pori-pori tanah tersebut, tidak bisa dilakukan dengan cara mekanis, tetapi harus dilakukan dengan cara lain seperti dipanaskan di dalam oven.

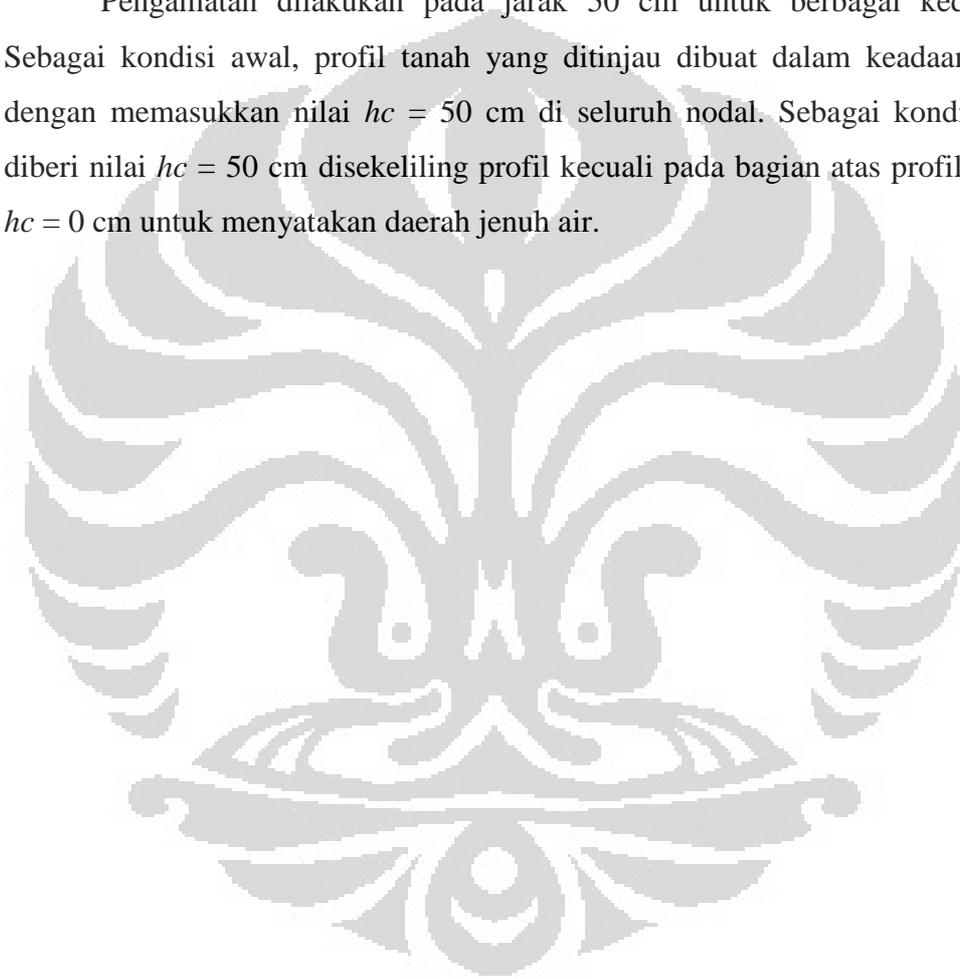
Semakin besar saturasi residual dari suatu medium berpori, maka sisa pori yang masih kosong semakin sedikit sehingga tanah semakin jenuh. Hal inilah yang akan diuji pada pengujian kali ini, yaitu apakah **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini memberikan hasil yang sesuai dengan teori tersebut dengan cara melihat besarnya saturasi untuk 3 (tiga) nilai saturasi residual yang berbeda.

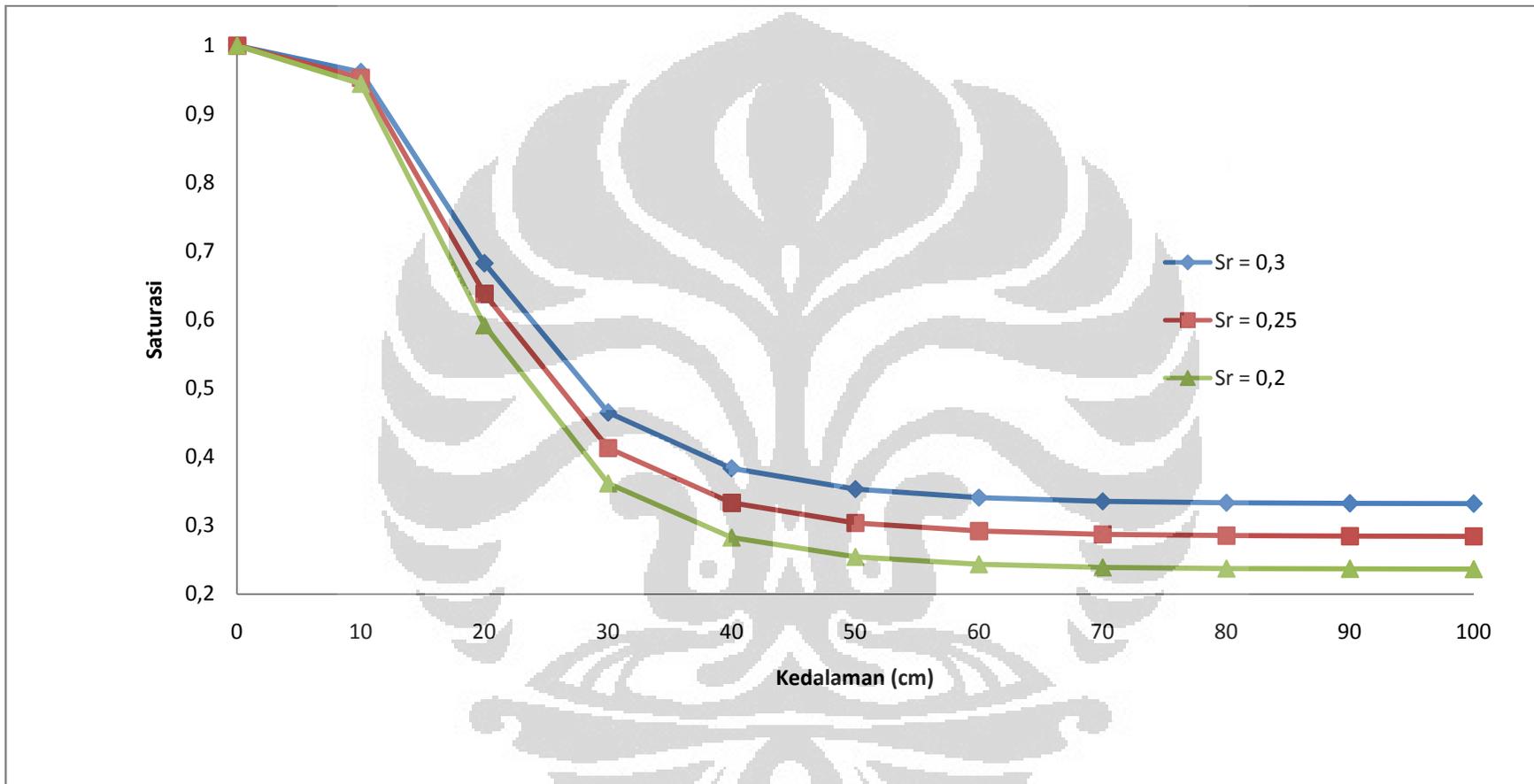
Dalam program ini, saturasi residual dilambangkan sebagai *Sr*. Nilai saturasi tanah berkisar antara 0 sampai 1 sehingga saturasi residual yang mungkin terjadi berada pada kisaran tersebut. Oleh karena itu, pada pengujian kali nilai saturasi residual yang ditinjau adalah sebagai berikut:

1. $Sr = 0,2$;
2. $Sr = 0,25$;
3. $Sr = 0,3$.

Data-data parameter yang lain, diambil sama untuk ketiga nilai saturasi residual, agar dapat diambil kesimpulan bahwa perubahan *output* yang terjadi disebabkan oleh perubahan saturasi residual. Data-data parameter yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada lampiran.

Pengamatan dilakukan pada jarak 50 cm untuk berbagai kedalaman. Sebagai kondisi awal, profil tanah yang ditinjau dibuat dalam keadaan kering dengan memasukkan nilai $hc = 50$ cm di seluruh nodal. Sebagai kondisi batas diberi nilai $hc = 50$ cm disekeliling profil kecuali pada bagian atas profil dimana $hc = 0$ cm untuk menyatakan daerah jenuh air.





Gambar 4.9. Grafik Saturasi untuk Setiap Kedalaman pada Berbagai S_r

Gambar 4.9. merupakan grafik antara nilai saturasi terhadap kedalaman tanah pada saat $T = 2000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi telah berlangsung. Pada pengujian ini memperlihatkan bahwa semakin besar nilai saturasi residual, tanah akan menjadi lebih jenuh. Hal ini disebabkan karena dengan semakin besar nilai saturasi residualnya, jumlah air yang tetap dipertahankan dalam tanah menjadi semakin besar. Namun, apabila dilihat dari kedalaman jenuhnya, maka saturasi residual tidak memberikan pengaruh yang besar pada pengujian yang dilakukan. Oleh karena itu, dapat diambil kesimpulan bahwa **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini memberikan respon yang sesuai dengan teori terhadap perubahan nilai saturasi residual.

4.7.3. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh

Nilai n dan a

Simbol n yang digunakan dalam **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini merupakan parameter yang berhubungan dengan kelengkungan grafik saturasi, yang dipengaruhi oleh distribusi gradasi butiran (*grain-size distribution*) dari medium berpori, dimana nilai n besar dimiliki oleh medium dengan gradasi buruk (*poorly graded*) dan nilai n yang kecil dimiliki oleh medium dengan gradasi baik (*well graded*). Tanah dikatakan bergradasi baik jika tidak ada partikel yang ukuran mencolok dalam satu rentang distribusi dan terdapat partikel berukuran sedang, sedangkan tanah dikatakan bergradasi buruk jika mempunyai ukuran butiran yang seragam atau tidak atau jarang terdapat partikel berukuran sedang. Hubungan antara gradasi tanah dengan saturasi dapat dilihat pada *Retention Curve* pada Gambar 2.5. Dimana berdasarkan gambar 2.5, tanah bergradasi baik akan lebih cepat jenuh dibandingkan dengan tanah bergradasi buruk. Hal ini disebabkan karena tanah bergradasi baik mempunyai porositas medium yang lebih besar sehingga tanah akan lebih cepat jenuh. Sehingga semakin kecil nilai n , maka tanah akan lebih cepat jenuh.

Sedangkan simbol a digunakan dalam **Program Aliran Skema Runge Kutta** untuk menggantikan simbol α yang merupakan parameter yang menyatakan letak dari *critical capillary head*, dimana air tidak akan meninggalkan tanah sampai tercapainya tekanan kapiler (*air entry pressure*). Dengan

meningkatnya nilai a , maka tekanan kapiler pada saat kritis (*air entry pressure*) akan meningkat, sehingga tinggi tekanan kapiler akan meningkat. Tinggi tekanan kapiler yang semakin tinggi, akan mengakibatkan nilai saturasi yang semakin kecil.

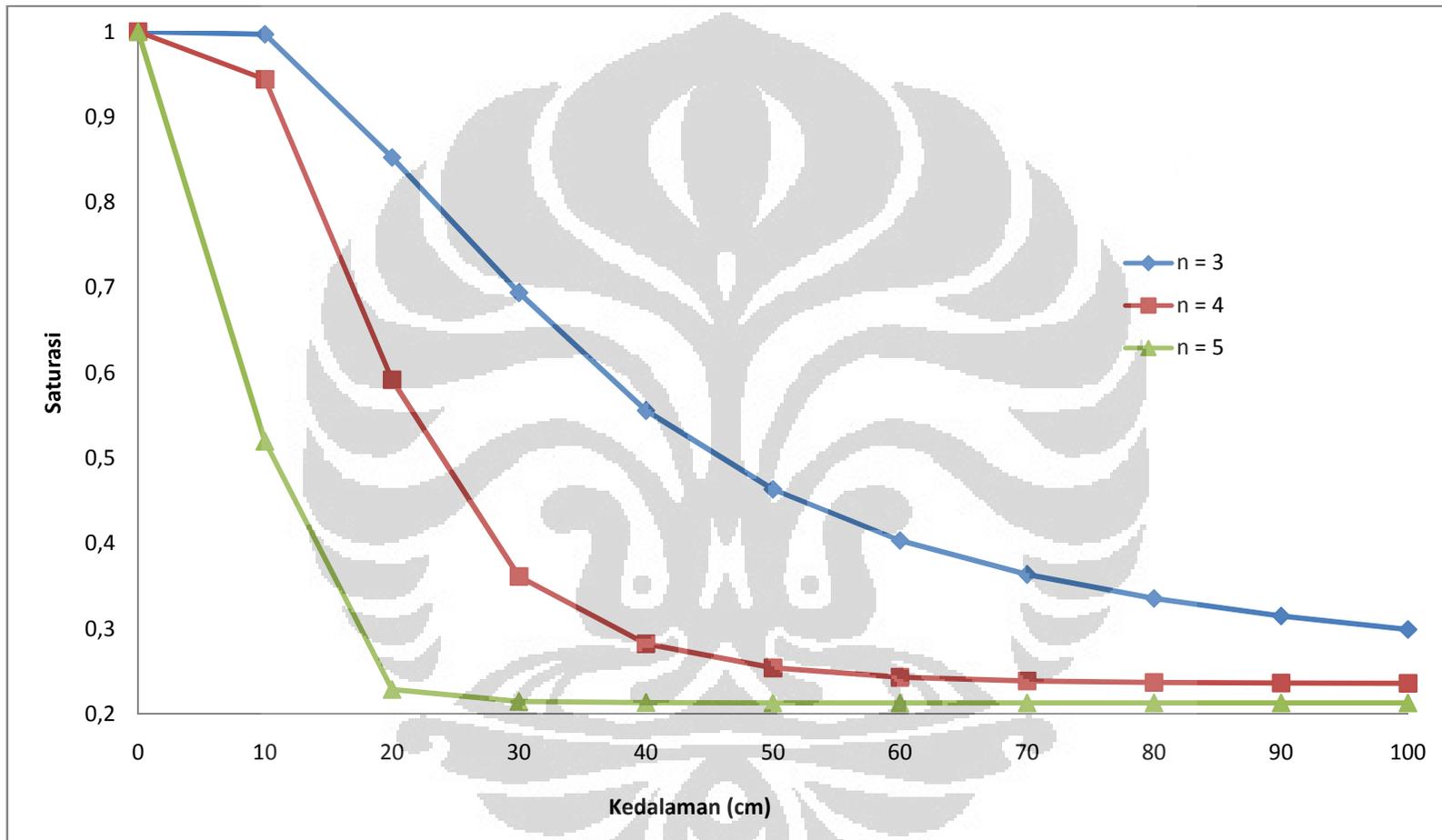
Melalui pengujian berikut, akan dibuktikan apakah **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini memberikan respons yang sesuai dengan teori di atas. Pengujian dilakukan dalam 2 (dua) tahap, yaitu :

1. untuk a tetap, dilakukan pengujian terhadap 3 (tiga) nilai n yang berbeda;
2. untuk n tetap, dilakukan pengujian terhadap 3 (tiga) nilai a yang berbeda.

Pada masing-masing tahap tersebut data-data parameter pembentuk lainnya dianggap tetap dan sama untuk setiap variasi nilai yang diuji. Untuk pengujian terhadap n , ditetapkan nilai $a = 0.028$ dan nilai n yang diuji adalah sebagai berikut:

1. $n = 3$;
2. $n = 4$;
3. $n = 5$.

Pengamatan dilakukan pada koordianat $(50,z)$ yaitu pada jarak 50 cm diberbagai kedalaman. Sebagai kondisi awal, profil tanah diambil dalam keadaan kering, ditandai dengan nilai $h_c = 50$ cm. Kemudian sebagai kondisi batas dibuat nilai $h_c = 50$ cm yang berarti tanah dalam keadaan kering disekeliling profil tanah, kecuali pada bagian atas profil diberi nilai $h_c = 0$ cm yang menunjukkan tanah dalam kondisi jenuh. Data-data parameter lain dapat dilihat pada lampiran. Setelah program dijalankan maka hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.11 berupa grafik hubungan saturasi terhadap kedalaman.



Gambar 4.10. Grafik Hubungan Saturasi terhadap Kedalaman pada Berbagai Nilai n

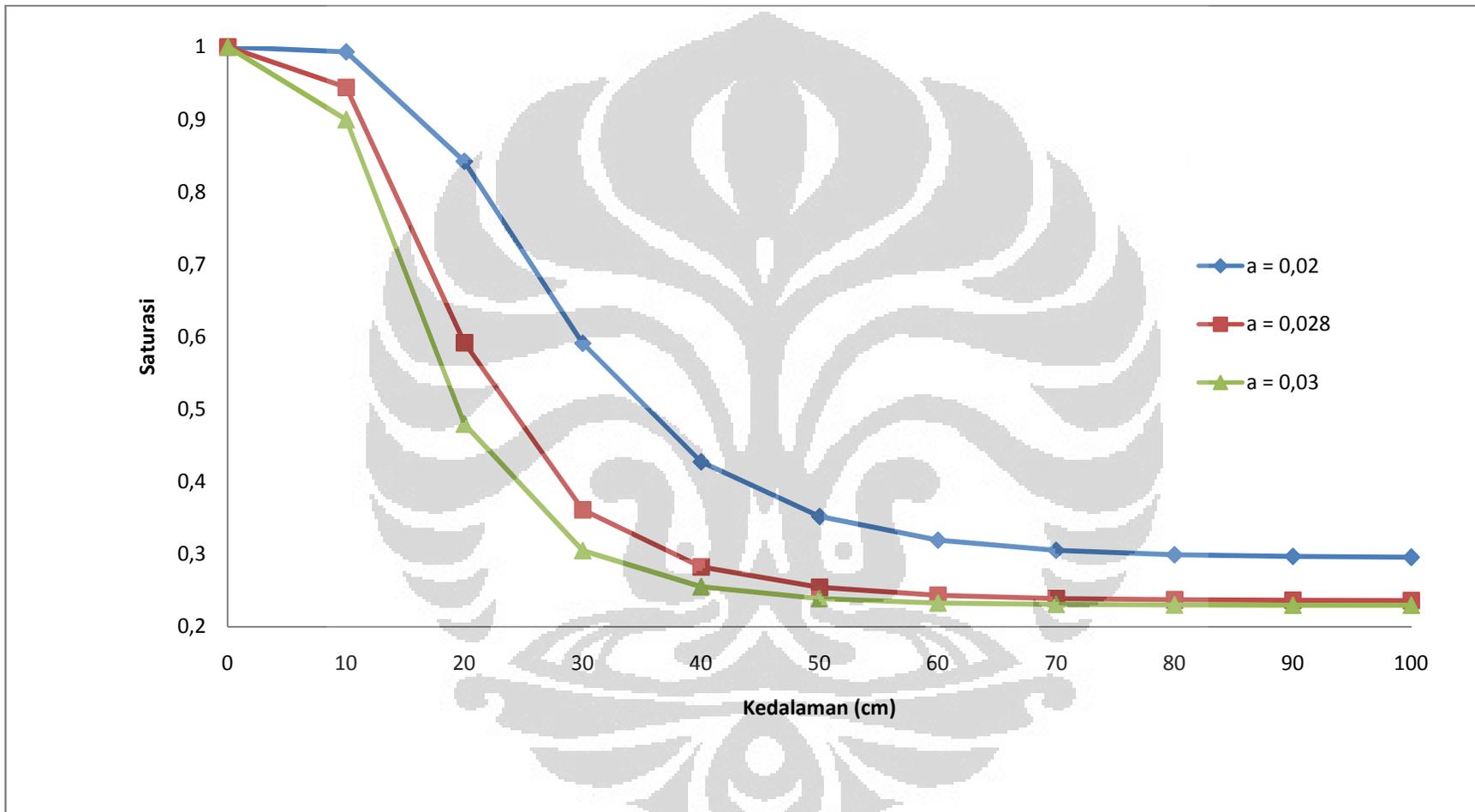
Gambar 4.10. merupakan grafik antara nilai saturasi terhadap kedalaman tanah pada saat $T = 2000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi telah berlangsung. Pada pengujian ini memperlihatkan bahwa semakin kecil nilai n , tanah akan menjadi lebih jenuh. Hal ini disebabkan karena dengan semakin kecil nilai n , tingkat gradasi tanah akan semakin baik sehingga porositas tanah akan semakin kecil. Hal yang sama juga dapat dilihat pada bentuk kurva yang terjadi, bahwa semakin besar nilai n maka kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman akan semakin cembung. Oleh karena itu, dapat diambil kesimpulan bahwa **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini memberikan respon yang sesuai dengan teori terhadap perubahan nilai n .

Pada kajian sebelumnya (Hendra Wijanoko, 1999) dengan menggunakan metode *Newton Raphson*, bentuk kurva yang dihasilkan pada pengujian kemampuan mensimulasi nilai n menghasilkan bentuk kurva yang berpotongan pada berbagai variasi nilai n , sehingga pengaruh perubahan nilai n pada nilai a yang tetap menjadi tidak terlihat. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan metode *Runge Kutta* orde 4 sebagai solusi numerik persamaan aliran air tanah menghasilkan keluaran (*output*) yang lebih stabil.

Setelah melakukan pengujian dengan nilai a tetap dan nilai n merubah, maka pada pengujian selanjutnya adalah dengan nilai n tetap dan a berubah. Berikut ini akan dilakukan pengujian terhadap nilai n tetap, yaitu $n = 4$, sedangkan nilai a bervariasi sebagai berikut :

1. $a = 0,02$;
2. $a = 0,028$;
3. $a = 0,03$.

Pengamatan dilakukan pada koordianat $(50,z)$ yaitu pada jarak 50 cm diberbagai kedalaman. Sebagai kondisi awal, profil tanah diambil dalam keadaan kering, ditandai dengan nilai $hc = 50$ cm. Kemudian sebagai kondsi batas dibuat nilai $hc = 50$ cm yang berarti tanah dalam keadaan kering disekeliling profil tanah, kecuali pada bagian atas profil diberi nilai $hc = 0$ cm. Data-data parameter lain dapat dilihat pada lampiran. Setelah program dijalankan maka hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.11 berupa grafik hubungan saturasi terhadap kedalaman.



Gambar 4.11. Grafik Hubungan Saturasi terhadap Kedalaman pada Berbagai nilai a

Gambar 4.11. merupakan grafik antara nilai saturasi terhadap kedalaman tanah pada saat $T = 2000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi telah berlangsung. Pada pengujian ini memperlihatkan bahwa semakin besar nilai a , nilai saturasi akan semakin kecil. Hal ini disebabkan karena dengan semakin besar nilai a , maka letak dari *critical capillary head* akan semakin tinggi sehingga tanah akan lebih jenuh. Oleh karena itu, dapat diambil kesimpulan bahwa **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini memberikan respon yang sesuai dengan teori terhadap perubahan nilai a .

Pada kajian sebelumnya (Hendra Wijanoko, 1999) dengan menggunakan metode *Newton Raphson*, bentuk kurva yang dihasilkan pada pengujian kemampuan mensimulasi nilai a menghasilkan bentuk kurva yang berpotongan pada berbagai variasi nilai a , sehingga pengaruh perubahan nilai a pada nilai n yang tetap menjadi tidak terlihat. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan metode *Runge Kutta* orde 4 sebagai solusi numerik persamaan aliran air tanah menghasilkan keluaran (*output*) yang lebih stabil.

4.7.4. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai Porositas

Porositas adalah perbandingan volume pori/rongga tanah terhadap volume tanah. Pada lembar masukan (*input*) **Program Aliran Skema Runge Kutta**, porositas dinyatakan dengan simbol pi . Apabila porositas tanah semakin besar, maka volume pori pada suatu profil tanah akan semakin besar, sehingga tekanan kapiler akan semakin kecil karena meningkatnya tekanan udara.

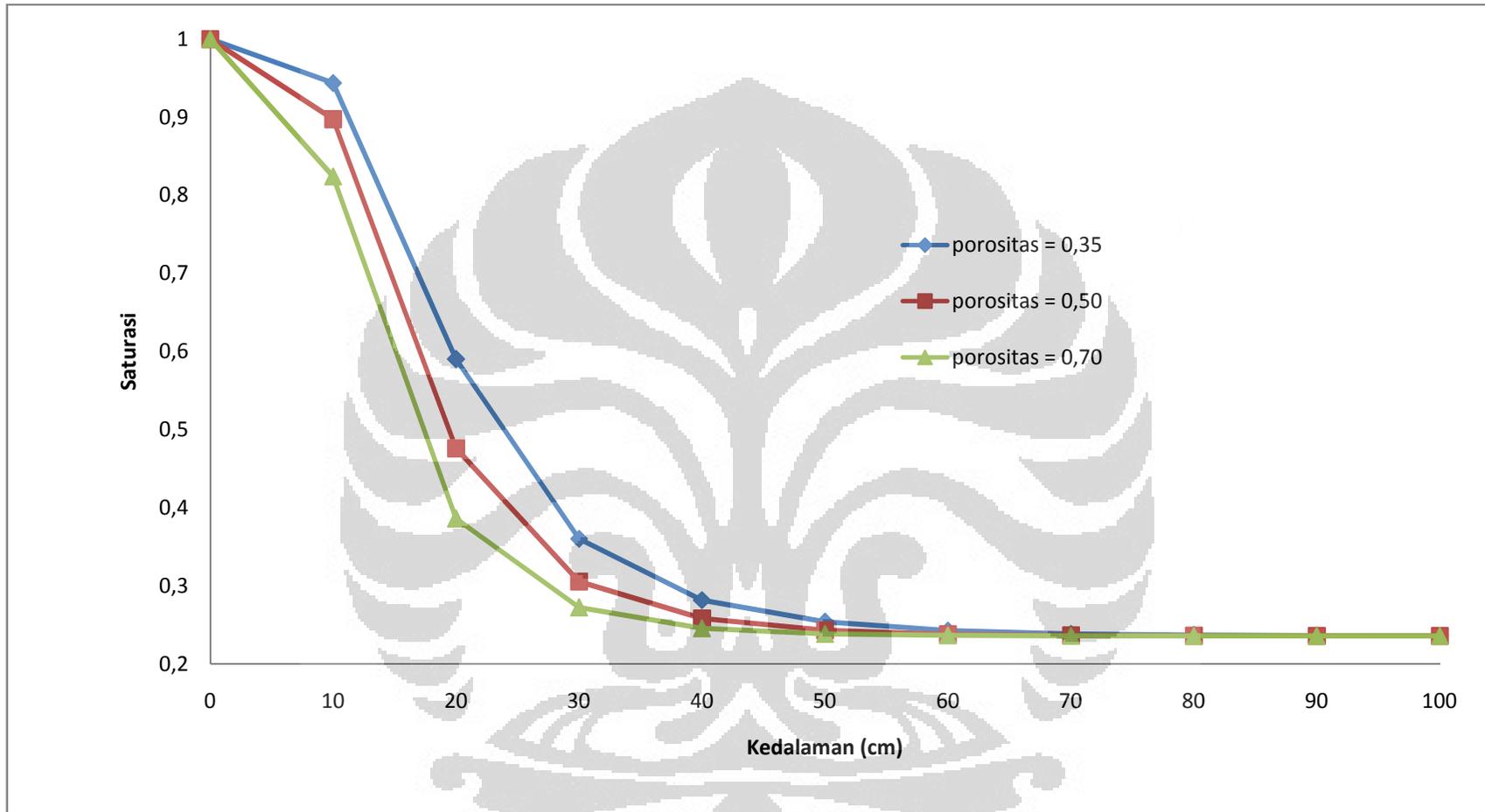
Dengan kata lain apabila porositas tanah semakin kecil maka tekanan kapiler akan meningkat dan tanah akan semakin jenuh. Hal inilah yang akan diuji pada pengujian kali ini, yaitu apakah **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini memberikan hasil yang sesuai dengan teori tersebut dengan cara melihat besarnya saturasi untuk 3 (tiga) nilai porositas yang berbeda. Pada pengujian kali ini nilai porositas yang ditinjau adalah sebagai berikut:

1. $pi = 0,35$;
2. $pi = 0,50$;
3. $pi = 0,70$.

Data-data parameter yang lain, diambil sama untuk ketiga nilai porositas, agar dapat diambil kesimpulan bahwa perubahan *output* yang terjadi disebabkan oleh perubahan porositas. Data-data parameter yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada lampiran.

Pengamatan dilakukan pada koordianat $(50,z)$ yaitu pada jarak 50 cm diberbagai kedalaman. Sebagai kondisi awal, profil tanah yang ditinjau dibuat dalam keadaan kering dengan memasukkan nilai $hc = 50$ cm di seluruh nodal. Sebagai kondisi batas diberi nilai $hc = 50$ cm disekeliling profil kecuali pada bagian atas profil dimana $hc = 0$ cm untuk menyatakan daerah jenuh air. Keluaran (output) yang dihasilkan ditunjukkan pada grafik Gambar 4.12.





Gambar 4.12 Grafik Hubungan Saturasi terhadap Kedalaman pada Berbagai Nilai Porositas

Gambar 4.12. merupakan grafik antara nilai saturasi terhadap kedalaman tanah pada saat $T = 2000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi telah berlangsung. Pada pengujian ini memperlihatkan bahwa semakin kecil nilai porositas, tanah akan menjadi lebih jenuh. Hal ini disebabkan karena dengan semakin besar nilai porositasnya, tekanan udara yang menekan pada pori-pori tanah akan semakin besar sehingga tekanan kapilernya akan berkurang. Namun, apabila dilihat dari kedalaman jenuhnya, maka porositas tidak memberikan pengaruh yang besar pada pengujian yang dilakukan. Oleh karena itu, dapat diambil kesimpulan bahwa **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini memberikan respon yang sesuai dengan teori terhadap perubahan nilai porositas.

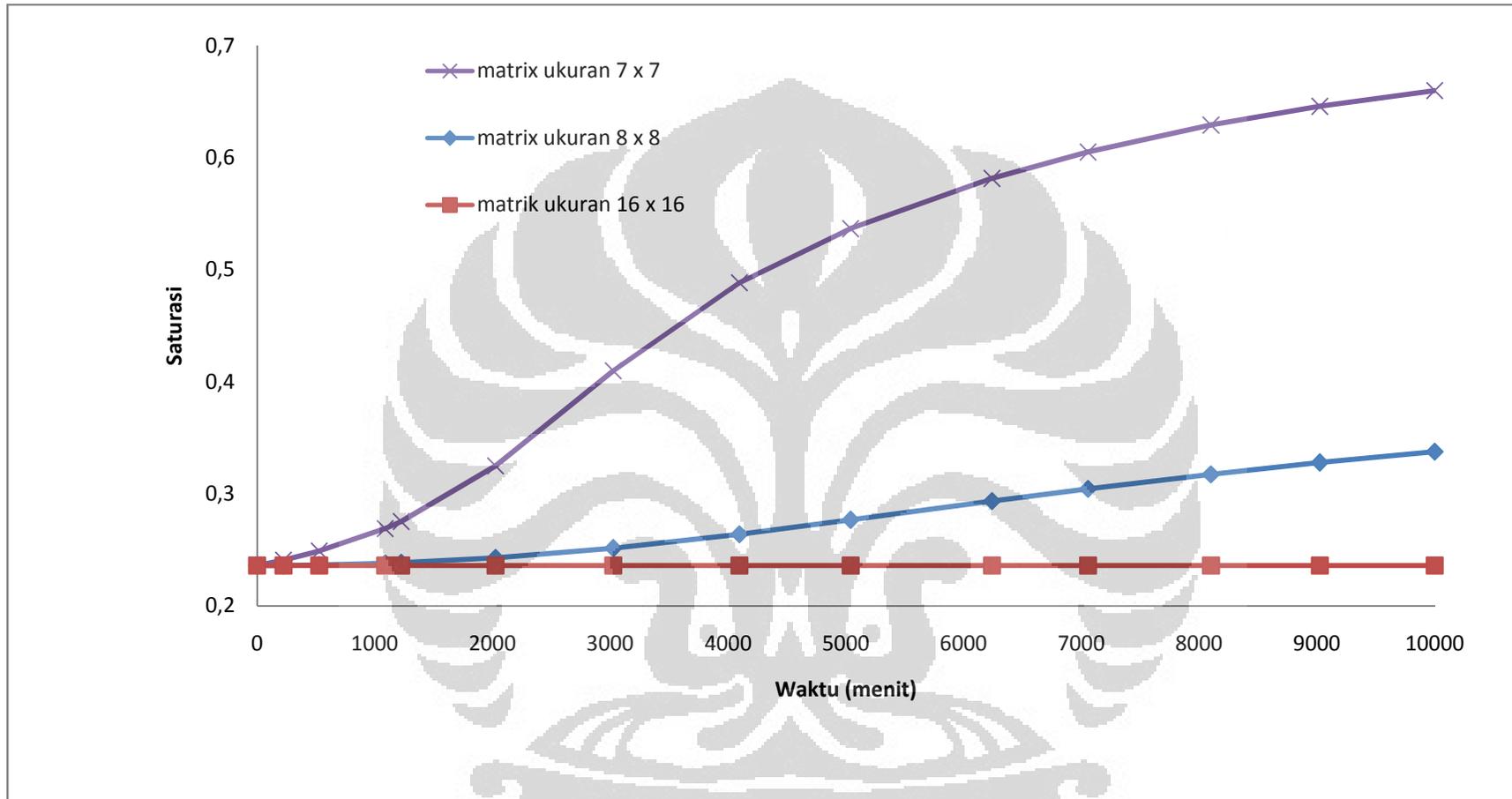
4.8. Pengujian Model terhadap Pemilihan Jumlah Nodal

Jumlah nodal merupakan gambaran dari pemodelan profil tanah yang ditinjau, dimana pemodelan ini menggunakan matrix berukuran persegi. Pada kajian sebelumnya (Hendra Wijanoko, 1999), pemodelan air tanah yang digunakan tidak bisa dilakukan untuk berbagai jumlah nodal. Sehingga pada pengamatan kali ini, akan dilakukan pengujian untuk berbagai variasi jumlah nodal. Pengujian ini penting untuk dilakukan, agar model komputer dapat mensimulasi berbagai kondisi yang ada di lapangan.

Sebagai kondisi awal pada pengamatan kali ini, tanah dibuat dalam kondisi kering dengan nilai *capillary pressure head* (h_c) = 100 cm diseluruh profil. Kemudian sebagai kondisi batas diberi nilai $h_c = 100$ cm disekeliling profil tanah, kecuali pada bagian bawah profil yang mempunyai nilai $h_c = 0$ cm. Dengan demikian seakan-akan terdapat daerah jenuh air pada bagian bawah profil, sehingga akan terjadi peristiwa *imbibition*. Pada pengujian kali ini, ukuran matrix nodal yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. matrix ukuran 7 x 7;
2. matrix ukuran 8 x 8;
3. matrix ukuran 16 x 16.

Pengamatan dilakukan pada koordinat nodal (30 ; 50) yaitu pada jarak 30 cm dan kedalaman 50 cm. Data-data parameter yang lain dapat dilihat pada lampiran. Keluaran (output) yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 4.13.



Gambar 4.13. Grafik Saturasi Pengujian Model terhadap Berbagai Jumlah Nodal

Pada Gambar 4.13 menunjukkan grafik saturasi terhadap waktu pada koordinat nodal (30,50). Pada gambar tersebut menunjukkan, bahwa apabila semakin besar ukuran matrix nodal maka untuk titik nodal yang sama nilai saturasinya akan semakin kecil. Hal ini karena apabila semakin besar jarak atau kedalaman suatu profil tanah, maka air akan memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai keadaan jenuh. Sehingga dapat disimpulkan, bahwa **Program Aliran Skema Runge Kutta** dapat digunakan pada berbagai jumlah nodal atau ukuran matrix yang berbentuk persegi.

4.9. Penerapan Program Aliran Air Tanah

Penerapan program aliran tanah ini sebenarnya dapat dikaitkan dengan berbagai peristiwa hidrolika yang terjadi pada lapisan tak jenuh air. Peristiwa ini antara lain infiltrasi dan *imbibition*. Apabila kita melihat isi **Program Aliran Air Tanah Skema Runge Kutta** ini maka sebenarnya kita membutuhkan paling tidak dua keadaan profil tanah yang ditinjau, yaitu kondisi profil tanah pada saat kondisi awal dan kondisi profil pada saat kondisi batas.

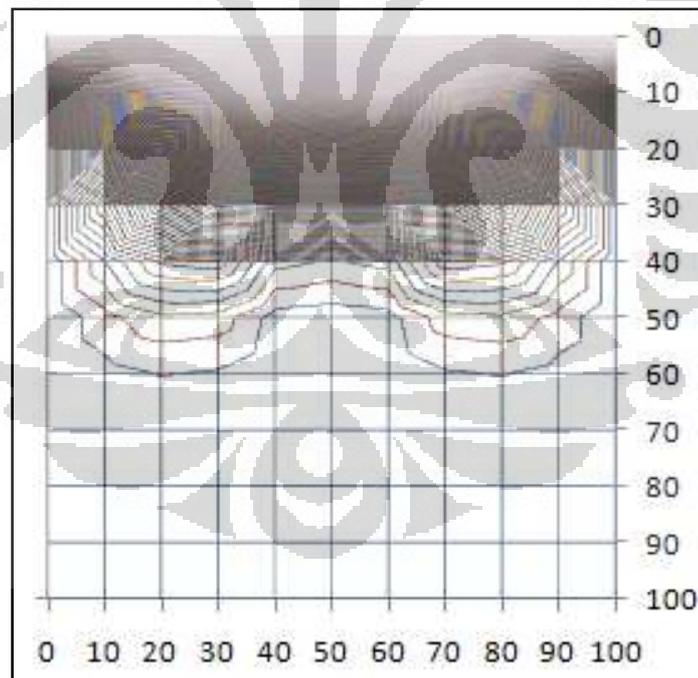
Untuk penerapan program aliran air tanah kali ini, penulis bermaksud menampilkan beberapa *media setting*, yaitu:

1. proses infiltrasi pada jenis tanah non homogen;
2. proses *imbibition* pada jenis tanah homogen;
3. proses *imbibition* pada jenis tanah non homogen.

4.9.1. Proses Infiltrasi pada Jenis Tanah *Non Homogen*

Seperti telah dijelaskan pada bab sebelumnya, proses infiltrasi adalah pergerakan air dari permukaan tanah menuju ke dalam tanah. Peristiwa infiltrasi dapat pula dicari pengaplikasiannya dalam program ini. Misalkan disuatu profil tanah dengan kondisi awal merupakan tanah kering, dengan diberi nilai tinggi tekanan kapiler disetiap titik nodal sebesar 100 cm. Kemudian pada kondisi batas diberi nilai $h_c = 100$ cm disekeliling profil tanah, kecuali pada bagian atas profil yang mempunyai nilai $h_c = 0$ cm. Dengan demikian seakan-akan terjadi hujan pada atas profil dan meninggalkan sisa-sisa air di permukaan profil yang dilambangkan dengan $h_c = 0$ cm.

Pada pengamatan kali ini, jenis tanah yang digunakan adalah tidak homogen, sehingga pada setiap profil tanah harga *saturated conductivity* tidak seluruhnya sama. Secara teoritis apabila aliran air tanah melalui tempat dimana nilai konduktivitas tanahnya lebih rendah dibandingkan dengan sekelilingnya maka air tanah tersebut akan menuju daerah yang nilai konduktivitas tanahnya lebih tinggi. Hal ini berhubungan dengan hukum Darcy yang mengatakan bahwa harga *hydraulic conductivity* (K) berbanding lurus dengan harga *flux* (q) aliran. Untuk data *input saturated conductivity* (K_s), perbedaan nilainya terletak pada titik nodal (40 ; 40), (40 ; 50), (40 ; 60), (50 ; 40), (50 ; 50), (50 ; 60), (60 ; 40), (60 ; 50), (60 ; 60) yaitu pada jarak 40 cm sampai dengan 60 cm dan kedalaman 40 sampai 60 cm, dengan nilai $K_s = 0,002$ cm/menit dan pada titik nodal yang lain nilai $K_s = 0,02$ cm/menit, pada $T_{Max} = 2000$ menit. Data parameter yang lain dapat dilihat pada lampiran dan keluaran (*output*) yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14. Kontur Saturasi pada Proses Infiltrasi pada Jenis Tanah Non Homogen
Untuk $T = 2000$ menit

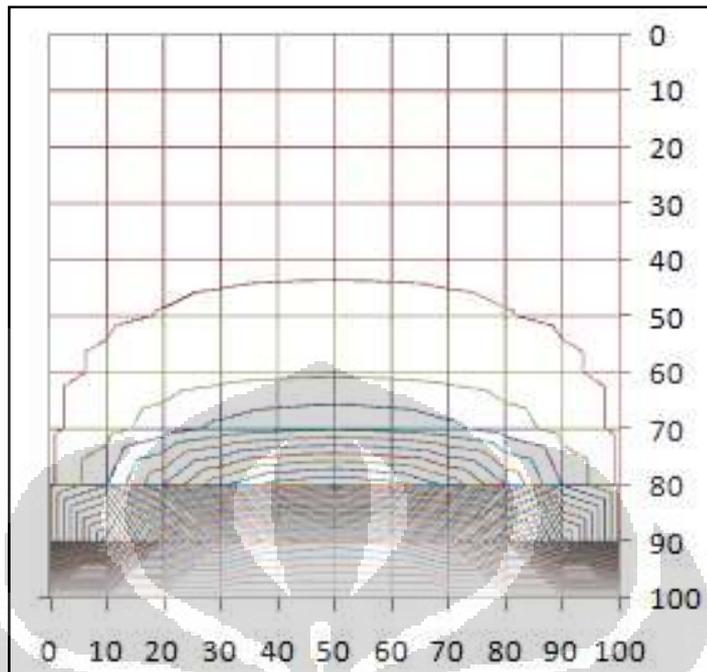
Pada Gambar 4.14 memperlihatkan bahwa nilai saturasi di daerah tengah dekat permukaan tanah lebih besar dibandingkan dengan daerah pinggirnya. Hal ini

menunjukkan bahwa tanah pada daerah tengah lebih basah dibandingkan dengan daerah pinggirnya. Pergerakan air dari permukaan tanah menuju lapisan tanah dibawahnya terlihat terhalang pada kedalaman 40 sampai 60 cm untuk jarak 40 sampai 60 cm. Terhalangnya aliran air dari permukaan tanah itu disebabkan karena pada daerah tersebut nilai *saturated conductivity*-nya lebih kecil dari daerah disekitarnya sehingga air membutuhkan waktu yang lebih lama untuk melewatinya. Dengan demikian maka **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini dapat memprediksi peristiwa infiltrasi pada tanah non homogen, karena respon yang diberikan pada model komputer ini sesuai dengan teori yang ada.

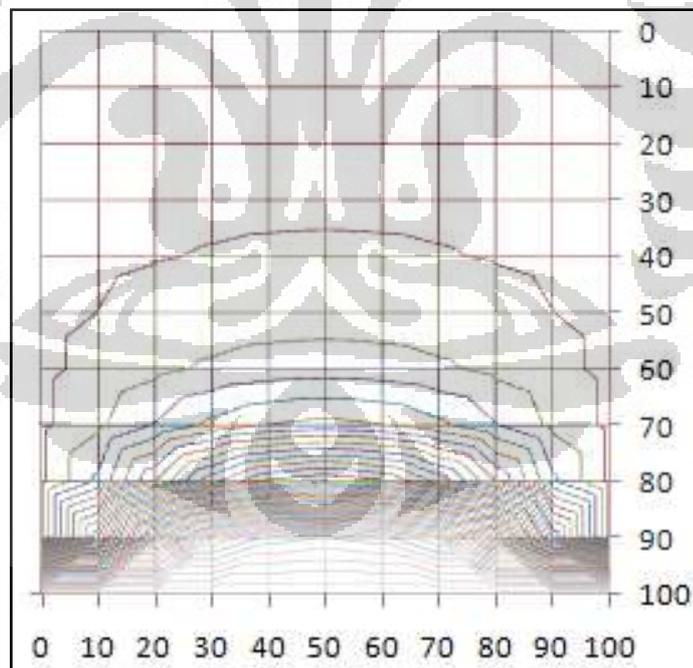
4.9.2. Proses *Imbibition* pada Jenis Tanah Homogen

Proses imbibisi (*imbibition*) adalah naiknya air tanah dari daerah jenuh air menuju daerah tak jenuh air. Naiknya air tanah di dalam pori tanah disebabkan oleh adanya tekanan kapiler yang menghisap air tanah menuju ke atas. Peristiwa imbibisi ini dapat pula dicari pengaplikasiannya dalam program ini. Misalkan disuatu profil tanah dengan kondisi awal merupakan tanah kering, dengan diberi nilai tinggi tekanan kapiler disetiap titik nodal sebesar 100 cm. Kemudian pada kondisi batas diberi nilai $h_c = 100$ cm sekeliling profil tanah, kecuali pada bagian bawah profil yang mempunyai nilai $h_c = 0$ cm. Dengan demikian seakan-akan terdapat daerah jenuh air atau muka air tanah pada bagian bawah profil tanah dilambangkan dengan $h_c = 0$ cm.

Pada pengamatan kali ini, jenis tanah yang digunakan adalah homogen, sehingga pada setiap profil tanah harga *saturated conductivity* yang sama yaitu sebesar 0,02 cm/menit. Lama pengamatan yang dilakukan adalah hingga mencapai $T_{Max} = 2000$ menit. Data parameter yang lain dapat dilihat pada lampiran dan keluaran (*output*) yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16.



Gambar 4.15. Kontur Saturasi pada Proses *Imbibition* untuk $T = 1445$ menit



Gambar 4.16. Kontur Saturasi pada Proses *Imbibition* untuk $T = 2000$ menit

Gambar 4.15 dan 4.16 menunjukkan kontur saturasi pada suatu profil tanah yang mengalami proses *imbibition*. Respon yang dihasilkan oleh program sesuai dengan teori yang dibahas sebelumnya, yaitu tentang adanya aliran air

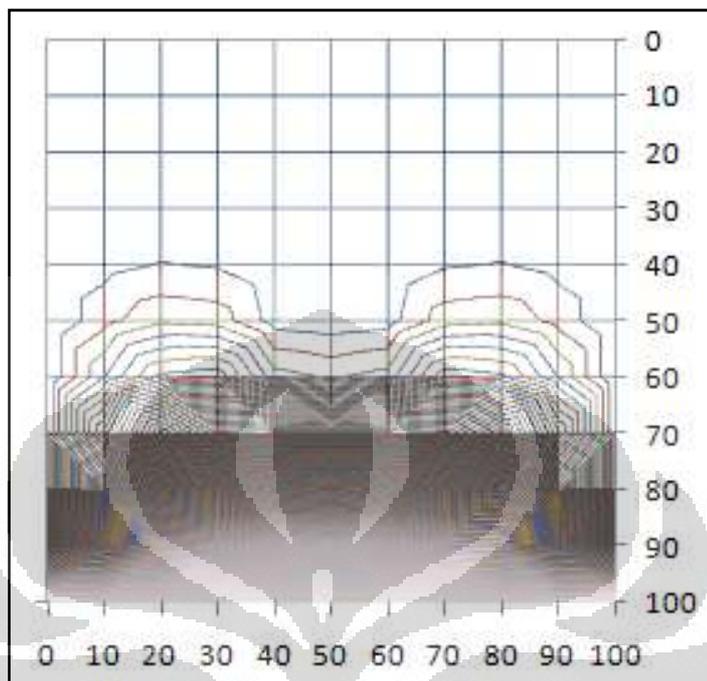
tanah menuju daerah tak jenuh air akibat adanya gaya kapiler. Adanya perbedaan waktu perhitungan juga menunjukkan gejala adanya aliran di daerah tak jenuh tersebut. Hal ini bisa dilihat pada kurva paling atas pada $T = 1445$ menit dengan nilai saturasi sebesar 0,243 belum melewati kedalaman 40 cm, akan tetapi pada saat $T = 2000$ menit, kurva tersebut sudah melewati kedalaman 40 cm. Dengan demikian maka **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini dapat memprediksi peristiwa *imbibition* pada daerah tak jenuh air untuk jenis tanah homogen, karena respon yang diberikan pada model komputer ini sesuai dengan teori yang ada.

4.9.3. Proses *Imbibition* pada Jenis Tanah Non Homogen

Proses imbibisi (*imbibition*) adalah naiknya air tanah dari daerah jenuh air menuju daerah tak jenuh air. Naiknya air tanah di dalam pori tanah disebabkan oleh adanya tekanan kapiler yang menghisap air tanah menuju ke atas. Peristiwa imbibisi ini dapat pula dicari pengaplikasiannya dalam program ini. Misalkan disuatu profil tanah dengan kondisi awal merupakan tanah kering, dengan diberi nilai tinggi tekanan kapiler disetiap titik nodal sebesar 100 cm. Kemudian pada kondisi batas diberi nilai $h_c = 100$ cm sekeliling profil tanah, kecuali pada bagian bawah profil yang mempunyai nilai $h_c = 0$ cm. Dengan demikian seakan-akan terdapat daerah jenuh air atau muka air tanah pada bagian bawah profil tanah dilambangkan dengan $h_c = 0$ cm.

Pada pengamatan kali ini, jenis tanah yang digunakan adalah tidak homogen, sehingga pada setiap profil tanah harga *saturated conductivity* tidak seluruhnya sama. Secara teoritis apabila aliran air tanah melalui tempat dimana nilai konduktivitas tanahnya lebih rendah dibandingkan dengan sekelilingnya maka air tanah tersebut akan menuju daerah yang nilai konduktivitas tanahnya lebih tinggi. Hal ini berhubungan dengan hukum Darcy yang mengatakan bahwa harga *hydraulic conductivity* (K) berbanding lurus dengan harga *flux* (q) aliran. Untuk data *input saturated conductivity* (K_s), perbedaan nilainya terletak pada titik nodal (40 ; 40), (40 ; 50), (40 ; 60), (50 ; 40), (50 ; 50), (50 ; 60), (60 ; 40), (60 ; 50), (60 ; 60) yaitu pada jarak 40 cm sampai dengan 60 cm dan kedalaman 40 sampai 60 cm, dengan nilai $K_s = 0,002$ cm/menit dan pada titik nodal yang lain nilai $K_s = 0,02$ cm/menit, pada $T_{Max} = 2000$ menit. Data parameter yang lain

dapat dilihat pada lampiran dan keluaran (*output*) yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Kontur Saturasi pada Proses Imbibition untuk Jenis Tanah Non Homogen untuk $T = 2000$ menit

Pada Gambar 4.17 memperlihatkan bahwa nilai saturasi di daerah tengah dekat permukaan tanah lebih besar dibandingkan dengan daerah pinggirnya. Hal ini menunjukkan bahwa tanah pada daerah tengah lebih basah dibandingkan dengan daerah pinggirnya. Pergerakan air dari daerah jenuh air menuju lapisan tanah di atasnya terlihat terhalang pada kedalaman 40 sampai 60 cm untuk jarak 40 sampai 60 cm. Terhalangnya aliran air dari permukaan tanah itu disebabkan karena pada daerah tersebut nilai *saturated conductivity*-nya lebih kecil dari daerah disekitarnya sehingga air membutuhkan waktu yang lebih lama untuk melewatinya. Dengan demikian maka **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini dapat memprediksi peristiwa *imbibition* pada tanah non homogen, karena respon yang diberikan pada model komputer ini sesuai dengan teori yang ada.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengembangan model aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air serta dengan melihat hasil pengujian **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini, penulis mengambil beberapa kesimpulan, yaitu:

- Program ini dikembangkan berdasarkan Formulasi Richards untuk persamaan aliran air tanah yang diselesaikan dengan menggunakan Metode Runge-Kutta orde 4 untuk domain temporal dan Metode Beda Hingga untuk domain spasial.
- Pada program aliran ini nilai *capillary pressure head* (h_c) pada kondisi kering diasumsikan sebesar 50 cm sampai dengan 100 cm. Penggunaan nilai ini dapat lebih efisien dalam menghasilkan grafik saturasi yang baik.
- Jumlah putaran komputasi (nT) sangat mempengaruhi terjadinya *error* atau tidaknya program. Pemilihan nilai jumlah putaran komputasi (nT) yang kecil akan mengakibatkan nilai selisih waktu (Δt) yang terlalu besar sehingga profil tanah akan lebih cepat jenuh sebelum mencapai T_{Max} . Penggunaan nilai jumlah putaran komputasi (nT) yang besar akan mengakibatkan nilai selisih waktu (Δt) akan menjadi lebih kecil, sehingga akan memperkecil terjadinya *error* pada model komputer.
- Nilai jumlah putaran komputasi (nT) maksimum yang dapat digunakan pada program adalah sebesar 2980.
- Program ini tidak sensitif terhadap perubahan parameter model seperti selisih waktu pada setiap kali putaran (ΔT), selisih jarak pada sumbu x (Δx), dan selisih jarak pada sumbu z (Δz).
- Program ini memberikan respon yang sesuai pada pengujian parameter lapangan, seperti *saturated conductivity* (K_s), saturasi residual (S_r), parameter yang berhubungan dengan kurva saturasi (n), parameter letak dari *critical capillary head* (a), dan porositas tanah (Φ).
- Penggunaan nilai *saturated conductivity* (K_s) yang terlalu besar akan mengakibatkan program tidak akan menjalankan perhitungan hingga akhir,

karena nilai saturasi sudah lebih dari 1 sebelum mencapai waktu perhitungan maksimum.

- Dibandingkan hasil keluaran yang dilakukan pada kajian sebelumnya (Hendra Wijanoko, 1999), maka dilihat dari grafik yang dihasilkan pada pengujian insensitivitas model terhadap pemilihan nilai selisih waktu (Δt) untuk setiap kali putaran komputasi, pengujian terhadap kemampuan mensimulasi pengaruh nilai n dan a , serta pengujian terhadap kemampuan mensimulasi nilai porositas, program ini memberikan hasil keluaran yang lebih stabil.
- Program ini dapat digunakan pada berbagai jumlah nodal atau ukuran matrix profil tanah.
- Program ini dapat memprediksi peristiwa infiltrasi dan peristiwa *imbibition* pada jenis tanah homogen atau *non* homogen. Jenis tanah homogen adalah tanah yang mempunyai nilai *hydraulic conductivity* yang sama pada suatu profil tanah, sedangkan jenis tanah non homogen adalah tanah yang mempunyai nilai *hydraulic conductivity* yang berbeda pada suatu profil tanah.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil pengujian dan pengamatan yang telah dilakukan, maka penulis memberikan beberapa saran, yaitu :

- Perlu dilakukan pengembangan lebih lanjut agar program aliran skema *Runge Kutta* ini masih dapat berjalan ketika nilai saturasi pada titik nodal yang belum diketahui sama dengan 1, sehingga program dapat memberikan hasil yang baik untuk berbagai variasi model dan pengujian lapangan.
- Perlu dilakukan pengujian dan pengembangan pada program Program aliran Skema *Runge Kutta* ini dalam memperkirakan proses infiltrasi pada lubang biopori dan sumur resapan.
- Pada Program aliran Skema *Runge Kutta* ini masih harus dilakukan satu alternatif pengujian lagi, yaitu pengujian konsistensi program terhadap percobaan fisik.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengembangan model aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air serta dengan melihat hasil pengujian **Program Aliran Skema Runge Kutta** ini, penulis mengambil beberapa kesimpulan, yaitu:

- Program ini dikembangkan berdasarkan Formulasi Richards untuk persamaan aliran air tanah yang diselesaikan dengan menggunakan Metode Runge-Kutta orde 4 untuk domain temporal dan Metode Beda Hingga untuk domain spasial.
- Pada program aliran ini nilai *capillary pressure head* (h_c) pada kondisi kering diasumsikan sebesar 50 cm sampai dengan 100 cm. Penggunaan nilai ini dapat lebih efisien dalam menghasilkan grafik saturasi yang baik.
- Jumlah putaran komputasi (nT) sangat mempengaruhi terjadinya *error* atau tidaknya program. Pemilihan nilai jumlah putaran komputasi (nT) yang kecil akan mengakibatkan nilai selisih waktu (Δt) yang terlalu besar sehingga profil tanah akan lebih cepat jenuh sebelum mencapai T_{Max} . Penggunaan nilai jumlah putaran komputasi (nT) yang besar akan mengakibatkan nilai selisih waktu (Δt) akan menjadi lebih kecil, sehingga akan memperkecil terjadinya *error* pada model komputer.
- Nilai jumlah putaran komputasi (nT) maksimum yang dapat digunakan pada program adalah sebesar 2980.
- Program ini tidak sensitif terhadap perubahan parameter model seperti selisih waktu pada setiap kali putaran (ΔT), selisih jarak pada sumbu x (Δx), dan selisih jarak pada sumbu z (Δz).
- Program ini memberikan respon yang sesuai pada pengujian parameter lapangan, seperti *saturated conductivity* (K_s), saturasi residual (S_r), parameter yang berhubungan dengan kurva saturasi (n), parameter letak dari *critical capillary head* (a), dan porositas tanah (Φ).
- Penggunaan nilai *saturated conductivity* (K_s) yang terlalu besar akan mengakibatkan program tidak akan menjalankan perhitungan hingga akhir,

karena nilai saturasi sudah lebih dari 1 sebelum mencapai waktu perhitungan maksimum.

- Dibandingkan hasil keluaran yang dilakukan pada kajian sebelumnya (Hendra Wijanoko, 1999), maka dilihat dari grafik yang dihasilkan pada pengujian insensitivitas model terhadap pemilihan nilai selisih waktu (Δt) untuk setiap kali putaran komputasi, pengujian terhadap kemampuan mensimulasi pengaruh nilai n dan a , serta pengujian terhadap kemampuan mensimulasi nilai porositas, program ini memberikan hasil keluaran yang lebih stabil.
- Program ini dapat digunakan pada berbagai jumlah nodal atau ukuran matrix profil tanah.
- Program ini dapat memprediksi peristiwa infiltrasi dan peristiwa *imbibition* pada jenis tanah homogen atau *non* homogen. Jenis tanah homogen adalah tanah yang mempunyai nilai *hydraulic conductivity* yang sama pada suatu profil tanah, sedangkan jenis tanah non homogen adalah tanah yang mempunyai nilai *hydraulic conductivity* yang berbeda pada suatu profil tanah.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil pengujian dan pengamatan yang telah dilakukan, maka penulis memberikan beberapa saran, yaitu :

- Perlu dilakukan pengembangan lebih lanjut agar program aliran skema *Runge Kutta* ini masih dapat berjalan ketika nilai saturasi pada titik nodal yang belum diketahui sama dengan 1, sehingga program dapat memberikan hasil yang baik untuk berbagai variasi model dan pengujian lapangan.
- Perlu dilakukan pengujian dan pengembangan pada program Program aliran Skema *Runge Kutta* ini dalam memperkirakan proses infiltrasi pada lubang biopori dan sumur resapan.
- Pada Program aliran Skema *Runge Kutta* ini masih harus dilakukan satu alternatif pengujian lagi, yaitu pengujian konsistensi program terhadap percobaan fisik.

DAFTAR REFERENSI

- Bear, Jacob, *Hydraulic of Groundwater*, McGraw-Hill Inc, 1979
- Bear, Jacob and Arnold Verruijt, *Modeling Groundwater Flow and Pollution*, Reidel Publishing Company, 1987
- Chapra, Steven C. and Raymond P. Canale., *Numerical Methods for Engineers with Personal Computer Application*, McGraw-Hill Inc., 1985
- Chow, Ven Te, Maidment and Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988
- Craig, Robert, *Mekanika Tanah* Terj, Budi Susilo, 1986
- Freeze, R. Allan and John A. Cherry., *Groundwater*, Prentice Hall Inc, 1979
- Potter, Merle and David Wiggert, *Mechanics of Fluids*, Prentice Hall Inc, 1997
- Nurhayati, Rina, *Pengembangan Model Infiltrasi ke Lapisan Tak Jenuh Air dari Badan Air Permukaan dengan Menggunakan Metode Beda Hingga*, Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1998
- Soemarto, C.D., *Hidrologi Teknik*, Usaha Nasional Surabaya - Indonesia, 1987
- Wijanoko, Hendra, *Pengembangan Model Aliran Air Tanah pada Lapisan Tak Jenuh Air dengan Menggunakan metode Beda Hingga*, Skripsi, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 1999

```
Public Sr As Double, a As Double, p As Double, n As Double
Public h() As Double, ht() As Double, hx() As Double, Ks() As
Double
Public Ux1() As Double, Uz1() As Double
Public Ux2() As Double, Uz2() As Double
Public Ux3() As Double, Uz3() As Double
Public Ux4() As Double, Uz4() As Double
Public x() As Double, z() As Double
Public nt As Double, TMax As Double, dt As Double, Nx As Integer,
Nz As Integer
Public k1() As Double, k2() As Double, k3() As Double, k4() As
Double
Public Q() As Double, ds() As Double, RK() As Double, dh() As
Double
Public Iiter As Integer, T As Single, it As Integer, ctr As Integer
```

```
Sub mulai()
DialogSheets("dialog1").Show
d_par = DialogSheets("dialog1").EditBoxes("Edit Box 11").Text
d_SbX = DialogSheets("dialog1").EditBoxes("Edit Box 12").Text
d_SbZ = DialogSheets("dialog1").EditBoxes("Edit Box 16").Text
d_Ks = DialogSheets("dialog1").EditBoxes("Edit Box 15").Text
d_initial = DialogSheets("dialog1").EditBoxes("Edit Box 13").Text
d_fixed = DialogSheets("dialog1").EditBoxes("Edit Box 17").Text
d_output = DialogSheets("dialog1").EditBoxes("Edit Box 14").Text

Sr = Range(d_par).Cells(1, 1).Value
a = Range(d_par).Cells(2, 1).Value
n = Range(d_par).Cells(3, 1).Value
p = Range(d_par).Cells(4, 1).Value
TMax = Range(d_par).Cells(5, 1).Value
nt = Range(d_par).Cells(6, 1).Value
Nz = Range(d_initial).Columns.Count - 1
Nx = Range(d_initial).Rows.Count - 1

ReDim h(0 To Nz, 0 To Nx), ht(0 To Nz, 0 To Nx), hx(0 To Nz, 0 To
Nx)
ReDim Ks(0 To Nz, 0 To Nx)
ReDim Ux1(0 To Nz, 0 To Nx), Uz1(0 To Nz, 0 To Nx)
ReDim Ux2(0 To Nz, 0 To Nx), Uz2(0 To Nz, 0 To Nx)
ReDim Ux3(0 To Nz, 0 To Nx), Uz3(0 To Nz, 0 To Nx)
ReDim Ux4(0 To Nz, 0 To Nx), Uz4(0 To Nz, 0 To Nx)
ReDim k1(0 To Nz, 0 To Nx), k2(0 To Nz, 0 To Nx)
ReDim k3(0 To Nz, 0 To Nx), k4(0 To Nz, 0 To Nx)
ReDim ds(0 To Nz, 0 To Nx), RK(0 To Nz, 0 To Nx), dh(0 To Nz, 0 To
Nx)

For i = 0 To Nx
  For j = 0 To Nz
    h(i, j) = Range(d_initial).Cells(i + 1, j + 1).Value
    If Not IsEmpty(Range(d_fixed).Cells(i + 1, j + 1)) Then
```

```

        ht(i, j) = Range(d_fixed).Cells(i + 1, j + 1).Value
    Else
        ht(i, j) = h(i, j)
    End If
    Ks(i, j) = Range(d_Ks).Cells(i + 1, j + 1).Value
Next j
Next i

ReDim x(0 To Nx)
For j = 0 To Nx
    x(j) = Range(d_SbX).Cells(1, j + 1).Value
Next j

ReDim z(0 To Nz)
For i = 0 To Nz
    z(i) = Range(d_SbZ).Cells(i + 1, 1).Value
Next i

Nx = Nx - 1
Nz = Nz - 1

Bt = 2
it = 0
T = 0
ct = TMax / nt ^ Bt
Do
    it = it + 1
    dt = ct * ((it ^ Bt)) - T
    T = T + dt
    Iter = 0

    Do
        Iter = Iter + 1
        For i = 1 To Nz
            For j = 1 To Nx
                'cari nilai k1
                Ux1(i, j) = qx(Ks(i, j), ht(i, j), ht(i, j + 1),
                    _ht(i, j), x(j + 1) - x(j)) - qx(Ks(i, j),
                    _ht(i, j), ht(i, j), ht(i, j - 1), x(j)
                    _ - x(j - 1))
                Uz1(i, j) = qz(Ks(i, j), ht(i, j), ht(i + 1, j),
                    _ht(i, j), z(i + 1) - z(i)) - qz(Ks(i, j),
                    _ ht(i, j), ht(i, j), ht(i - 1, j),
                    _ z(i) - z(i - 1))
                k1(i, j) = Ux1(i, j) / ((x(j + 1) - x(j - 1)) / 2)
                    _ + Uz1(i, j) / ((z(i + 1) - z(i - 1)) / 2)

                'cari nilai k2
                Ux2(i, j) = qx(Ks(i, j), ht(i, j) + 0.5 * k1(i, j)
                    _ * dt, ht(i, j + 1) + 0.5 * k1(i, j) * dt,
                    _ht(i, j) + 0.5 * k1(i, j) * dt, x(j + 1) -

```

```

_x(j)) - qx(Ks(i, j), ht(i, j) + 0.5 * k1(i, j)
_* dt, ht(i, j) + 0.5 * k1(i, j) * dt,
_ht(i, j - 1) + 0.5 * k1(i, j) * dt,
_x(j) - x(j - 1))
Uz2(i, j) = qz(Ks(i, j), ht(i, j) + 0.5 * k1(i, j)
_* dt, ht(i + 1, j) + 0.5 * k1(i, j) * dt,
_ht(i, j) + 0.5 * k1(i, j) * dt,
_z(i + 1) - z(i)) - qz(Ks(i, j), ht(i, j) +
_0.5 * k1(i, j) * dt, ht(i, j) + 0.5 *
_k1(i, j) * dt, ht(i - 1, j) + 0.5 *
_k1(i, j) * dt, z(i) - z(i - 1))
k2(i, j) = Ux2(i, j) / ((x(j + 1) - x(j - 1)) / 2)
_ + Uz2(i, j) / ((z(i + 1) - z(i - 1)) / 2)

'cari nilai k3
Ux3(i, j) = qx(Ks(i, j), ht(i, j) + 0.5 * k2(i, j)
_* dt, ht(i, j + 1) + 0.5 * k2(i, j) * dt,
_ht(i, j) + 0.5 * k2(i, j) * dt, x(j + 1)
_ - x(j)) - qx(Ks(i, j), ht(i, j) + 0.5 *
_k2(i, j) * dt, ht(i, j) + 0.5 * k2(i, j) * dt,
_ ht(i, j - 1) + 0.5 * k2(i, j) * dt,
_ x(j) - x(j - 1))
Uz3(i, j) = qz(Ks(i, j), ht(i, j) + 0.5 * k2(i, j)
_* dt, ht(i + 1, j) + 0.5 * k2(i, j) * dt,
_ht(i, j) + 0.5 * k2(i, j) * dt, z(i + 1) -
_z(i)) - qz(Ks(i, j), ht(i, j) + 0.5 * k2(i, j)
_* dt, ht(i, j) + 0.5 * k2(i, j) * dt,
_ht(i - 1, j) + 0.5 * k2(i, j) * dt,
_z(i) - z(i - 1))
k3(i, j) = Ux3(i, j) / ((x(j + 1) - x(j - 1)) / 2)
_ + Uz3(i, j) / ((z(i + 1) - z(i - 1)) / 2)

'cari nilai k4
Ux4(i, j) = qx(Ks(i, j), ht(i, j) + k3(i, j) * dt,
_ht(i, j + 1) + k3(i, j) * dt, ht(i, j) +
_ k3(i, j) * dt, x(j + 1) - x(j)) - qx(Ks(i, j),
_ ht(i, j) + k3(i, j) * dt, ht(i, j) +
_ k3(i, j) * dt, ht(i, j - 1) + k3(i, j) * dt,
_ x(j) - x(j - 1))
Uz4(i, j) = qz(Ks(i, j), ht(i, j) + k3(i, j) * dt,
_ht(i + 1, j) + k3(i, j) * dt, ht(i, j) +
_ k3(i, j) * dt, z(i + 1) - z(i)) - qz(Ks(i, j),
_ ht(i, j) + k3(i, j) * dt, ht(i, j) +
_ k3(i, j) * dt, ht(i - 1, j) + k3(i, j) * dt,
_ z(i) - z(i - 1))
k4(i, j) = Ux4(i, j) / ((x(j + 1) - x(j - 1)) / 2)
_ + Uz4(i, j) /
_ ((z(i + 1) - z(i - 1)) / 2)

Next j
Next i

```

```

'cari nilai saturasi yang baru
For i = 0 To Nz + 1
  For j = 0 To Nx + 1
    RK(i, j) = ((k1(i, j) + 2 * k2(i, j) + 2 *
      _k3(i, j) + k4(i, j)) / 6) * dt / p
    ds(i, j) = S(ht(i, j)) - RK(i, j)
  Next j
Next i

'cari h baru
For i = 0 To Nz + 1
  For j = 0 To Nx + 1
    If i = 0 Or j = 0 Or i = Nz + 1 Or j = Nx + 1 Then
      hx(i, j) = h(i, j)
    Else
      hx(i, j) = Sh(ds(i, j))
    End If
  Next j
Next i

Loop Until Iter >= 50

For i = 1 To Nz
  For j = 1 To Nx
    ht(i, j) = hx(i, j)
  Next j
Next i

'cetak output berupa nilai saturasi dan capillary head yang
baru
Range(d_output).Cells(1, 1).Value = "OUTPUT PROGRAM ALIRAN SKEMA
RUNGE KUTTA"
Range(d_output).Cells(2, 1).Value = "by: Firman Reza Persada
(Sipil 2006)"

If it > 1 Then
  ctr = (it - 1) * Nz + (5 * it - 4)
Else
  ctr = (it - 1) * Nz + 1
End If
space3 = Nx + 4

Range(d_output).Cells(4, 1).Value = "TMax"
Range(d_output).Cells(5, 1).Value = TMax
Range(d_output).Cells(4, 2).Value = "Iter"
Range(d_output).Cells(5, 2).Value = Iter
Range(d_output).Cells(4, 3).Value = "nT"
Range(d_output).Cells(5, 3).Value = nt
Range(d_output).Cells(4, 4).Value = "Sr"
Range(d_output).Cells(5, 4).Value = Sr
Range(d_output).Cells(4, 5).Value = "porositas"

```

```

Range(d_output).Cells(5, 5).Value = p
Range(d_output).Cells(4, 6).Value = "dx"
Range(d_output).Cells(5, 6).Value = x(Nx) - x(Nx - 1)
Range(d_output).Cells(4, 7).Value = "dz"
Range(d_output).Cells(5, 7).Value = z(Nz) - z(Nz - 1)
Range(d_output).Cells(4, 8).Value = Ks
Range(d_output).Cells(5, 8).Value = Ks
Range(d_output).Cells(4, 9).Value = "n"
Range(d_output).Cells(5, 9).Value = n
Range(d_output).Cells(4, 10).Value = "a"
Range(d_output).Cells(5, 10).Value = a

For i = 0 To Nz + 1
  For j = 0 To Nx + 1
    Range(d_output).Cells(8 + ctr, 4).Value = "S(x,z)"
    Range(d_output).Cells(9 + ctr + i, j + 5).Value = ds(i, j)
    Range(d_output).Cells(8 + ctr, j + 5).Value = x(j)
    Range(d_output).Cells(9 + ctr + i, 4).Value = z(i)
    Range(d_output).Cells(8 + ctr, space3 + 4).Value = "hc(x,z)"
    Range(d_output).Cells(9 + ctr + i, space3 + j + 5).Value =
      _ht(i, j)
    Range(d_output).Cells(8 + ctr, space3 + j + 5).Value = x(j)
    Range(d_output).Cells(9 + ctr + i, space3 + 4).Value = z(i)
    Range(d_output).Cells(8 + ctr, 1).Value = "t = "
    Range(d_output).Cells(8 + ctr, 2).Value = T
    Range(d_output).Cells(9 + ctr, 1).Value = "dt = "
    Range(d_output).Cells(9 + ctr, 2).Value = dt
  Next j
Next i

Loop Until T > TMax
End Sub

```

```

'FUNGSI SATURASI EFEKTIF
Function Se(h) As Double
Se = (1 + (a * h) ^ n) ^ (1 / n - 1)
End Function

```

```

'FUNGSI SATURASI
Function S(h) As Double
S = Sr + (1 - Sr) * Se(h)
End Function

```

```

'FUNGSI K RELATIF
Function Kr(h) As Double
Kr = Sqr(Se(h)) * (1 - (1 - Se(h) ^ ((n - 1) / n)) ^ (n / (n -
1))) ^ 2
End Function

```

```

'cari nilai qz

```

```
Function qz(k As Double, h As Double, hu As Double, hd As Double, dz) As Double
qz = k * Kr(h) * ((hu - hd) / dz - 1)
End Function
```

```
'cari nilai qx
Function qx(k As Double, h As Double, hu As Double, hd As Double, dx) As Double
qx = k * Kr(h) * ((hu - hd) / dx)
End Function
```

```
'cari h baru
Function Sh(h) As Double
Seh = (h - Sr) / (1 - Sr)
Sh = (((Seh ^ (n / (1 - n))) - 1) ^ (1 / n)) / a
End Function
```



II.1. Masukan (*Input*) Data Pada Perbandingan Perhitungan Model Komputer dengan *Microsoft Excel*

INPUT DATA PARAMETER					
Sr	0,2				
a	0,028				
n	4				
pi	0,35				
Tmax	10 menit				
nT	10				
initial condition					
	0	5	10	15	20
0	75	75	75	75	75
5	75	75	75	75	75
10	75	75	75	75	75
15	75	75	75	75	75
20	75	75	75	75	75
boundary condition					
	0	5	10	15	20
0	75	75	75	75	75
5	75				75
10	75				75
15	75				75
20	0	0	0	0	0
saturated conductivity (cm/menit)					
	0	5	10	15	20
0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
5	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
10	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
15	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
20	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

II.2. Contoh *Input Data* pada Berbagai Pengujian Parameter Model

INPUT DATA PARAMETER											
Sr	0,2										
s	0,028										
n	4										
pi	0,33										
Tmax	30000 menit										
nT	1500										
initial condition											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
5	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
10	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
15	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
20	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
25	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
30	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
35	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
boundary condition											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
5	50										50
10	50										50
15	50										50
20	50										50
25	50										50
30	50										50
35	50										50
40	50										50
45	50										50
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
saturated conductivity (cm/menit)											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
5	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
10	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
15	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
20	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
25	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
30	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
35	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
40	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
45	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
50	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03

II.3. Contoh *Input Data* pada Pengujian Nilai *Saturated Conductivity*

INPUT DATA PARAMETER											
Sr	0,2										
a	0,028										
n	4										
pi	0,33										
Tmax	30000 menit										
nT	1500										
initial condition											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
5	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
10	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
15	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
20	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
25	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
30	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
35	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
boundary condition											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
5	50										50
10	50										50
15	50										50
20	50										50
25	50										50
30	50										50
35	50										50
40	50										50
45	50										50
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
saturated conductivity (cm/menit)											
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
5	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
10	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
15	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
20	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
25	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
30	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
35	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
40	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
45	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03
50	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03	6,00E-03

II.4. Contoh *Input* Data pada Pengujian Nilai Saturasi Residual, Nilai n dan α , dan Nilai Porositas

INPUT DATA PARAMETER											
Sr	0,2										
a	0,028										
n	5										
pi	0,35										
Tmax	2000 menit										
nT	400										
initial condition											
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
boundary condition											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
10	100										100
20	100										100
30	100										100
40	100										100
50	100										100
60	100										100
70	100										100
80	100										100
90	100										100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
saturated conductivity (cm/menit)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
10	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
30	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
40	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
50	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
60	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
70	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
80	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
90	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

II.5. Input Data pada Matrix Ukuran Profil Tanah 7 x 7

INPUT DATA PARAMETER							
Sr	0,2						
a	0,028						
n	4						
pi	0,35						
Tmax	10000 menit						
nT	500						
initial condition							
	0	10	20	30	40	50	60
0	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100
boundary condition							
	0	10	20	30	40	50	60
0	100	100	100	100	100	100	100
10	100						100
20	100						100
30	100						100
40	100						100
50	100						100
60	0	0	0	0	0	0	0
saturated conductivity (cm/menit)							
	0	10	20	30	40	50	60
0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
10	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
20	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
30	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
40	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
50	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
60	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

II.6. Input Data pada Matrix Ukuran Profil Tanah 8 x 8

INPUT DATA PARAMETER								
Sr	0,2							
a	0,028							
n	4							
pi	0,35							
Tmax	10000 menit							
nT	500							
initial condition								
	0	10	20	30	40	50	60	70
0	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100	100
boundary condition								
	0	10	20	30	40	50	60	70
0	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100							100
20	100							100
30	100							100
40	100							100
50	100							100
60	100							100
70	0	0	0	0	0	0	0	0
saturated conductivity (cm/menit)								
	0	10	20	30	40	50	60	70
0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
10	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
20	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
30	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
40	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
50	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
60	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
70	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

II.7. Input Data pada Matrix Ukuran Profil Tanah 16 x 16

INPUT DATA PARAMETER																
Sr	0,2															
a	0,028															
n	4															
pl	0,25															
Tmax	10000 menit															
nT	500															
Initial condition																
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
110	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
120	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
130	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
140	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
150	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Boundary condition																
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
110	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
120	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
130	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
140	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
saturated conductivity (cm/menit)																
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
0	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
10	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
20	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
30	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
40	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
50	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
60	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
70	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
80	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
90	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
100	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
110	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
120	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
130	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
140	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
150	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

II.8. Input Data Penerapan Program Pada Proses Infiltrasi untuk Jenis Tanah Non Homogen

INPUT DATA PARAMETER											
Sr	0,2										
s	0,028										
n	4										
pi	0,33										
Tmax	2000 menit										
nT	400										
initial condition											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
boundary condition											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
10	100										100
20	100										100
30	100										100
40	100										100
50	100										100
60	100										100
70	100										100
80	100										100
90	100										100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
saturated conductivity (cm/menit)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
10	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
30	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
40	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
50	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
60	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
70	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
80	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
90	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

II.9. Input Data Penerapan Program Pada Proses *Imbibition* untuk Jenis Tanah Homogen

DATA PARAMETER											
Sr	0,2										
a	0,028										
n	4										
pi	0,35										
Tmax	2000 menit										
nT	400										
initial condition											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
boundary condition											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100										100
20	100										100
30	100										100
40	100										100
50	100										100
60	100										100
70	100										100
80	100										100
90	100										100
100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
saturated conductivity (cm/menit)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
10	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
30	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
40	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
50	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
60	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
70	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
80	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
90	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

II.10. Input Data Penerapan Progam Pada Proses *Imbibition* untuk Jenis Tanah Non Homogen

DATA PARAMETER											
Sr	0,2										
a	0,028										
n	4										
pi	0,35										
Tmax	2000 menit										
nT	400										
initial condition											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
boundary condition											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100										100
20	100										100
30	100										100
40	100										100
50	100										100
60	100										100
70	100										100
80	100										100
90	100										100
100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
saturated conductivity (cm/menit)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
10	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
30	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
40	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
50	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
60	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
70	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
80	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
90	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Lampiran 3: Keluaran (*Output*) Program Aliran Skema Runge Kutta

III.1. Keluaran (*Output*) Pada Penerapan Program Aliran untuk Proses Infiltrasi untuk Jenis Tanah Non Homogen

TMax	Iter	nT	Sr	porositas	dx	dz	Ks	n	a
2000	50	400	0,2	0,35	10	10	0,02	4	0,028

t = 2000

dt = 9,987549

S(x,z)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0,236005	0,415425	0,677319	0,810263	0,85524	0,86582	0,85524	0,810263	0,677319	0,415425	0,236005
20	0,236005	0,282655	0,349546	0,405229	0,431714	0,438917	0,431714	0,405229	0,349546	0,282655	0,236005
30	0,236005	0,254526	0,274766	0,287476	0,288306	0,288373	0,288306	0,287476	0,274766	0,254526	0,236005
40	0,236005	0,243913	0,250487	0,25143	0,242837	0,241777	0,242837	0,25143	0,250487	0,243913	0,236005
50	0,236005	0,239302	0,241536	0,241127	0,237124	0,236658	0,237124	0,241127	0,241536	0,239302	0,236005
60	0,236005	0,237306	0,238076	0,237779	0,236255	0,236088	0,236255	0,237779	0,238076	0,237306	0,236005
70	0,236005	0,236486	0,236753	0,236648	0,23624	0,236131	0,23624	0,236648	0,236753	0,236486	0,236005
80	0,236005	0,23617	0,23626	0,236231	0,236121	0,236081	0,236121	0,236231	0,23626	0,23617	0,236005
90	0,236005	0,236054	0,23608	0,236074	0,236047	0,236035	0,236047	0,236074	0,23608	0,236054	0,236005
100	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005

III.2. Keluaran (*Output*) Pada Penerapan Program Aliran untuk Proses *Imbibition* untuk jenis Tanah Homogen

TMax	Iter	nT	Sr	porositas	dx	dz	Ks	n	a
2000	50	400	0,2	0,35	10	10	0,02	4	0,028

t =	1445	S(x,z)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		0	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005
		10	0,236005	0,236022	0,236036	0,236045	0,23605	0,236052	0,23605	0,236045	0,236036	0,236022	0,236005
		20	0,236005	0,236074	0,236131	0,23617	0,236191	0,236198	0,236191	0,23617	0,236131	0,236074	0,236005
		30	0,236005	0,236253	0,236458	0,236599	0,236676	0,2367	0,236676	0,236599	0,236458	0,236253	0,236005
		40	0,236005	0,236806	0,237482	0,237951	0,238211	0,238293	0,238211	0,237951	0,237482	0,236806	0,236005
		50	0,236005	0,238353	0,240416	0,241891	0,242726	0,242991	0,242726	0,241891	0,240416	0,238353	0,236005
		60	0,236005	0,242319	0,248357	0,252928	0,255613	0,256479	0,255613	0,252928	0,248357	0,242319	0,236005
		70	0,236005	0,252141	0,270135	0,285083	0,294312	0,297353	0,294312	0,285083	0,270135	0,252141	0,236005
		80	0,236005	0,279533	0,340796	0,396093	0,430338	0,441477	0,430338	0,396093	0,340796	0,279533	0,236005
		90	0,236005	0,410705	0,664621	0,800582	0,851409	0,864262	0,851409	0,800582	0,664621	0,410705	0,236005
		100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

t =	2000	S(x,z)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		0	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005
		10	0,236005	0,236081	0,236148	0,236198	0,236227	0,236237	0,236227	0,236198	0,236148	0,236081	0,236005
		20	0,236005	0,236254	0,236472	0,236636	0,236734	0,236766	0,236734	0,236636	0,236472	0,236254	0,236005
		30	0,236005	0,236696	0,23731	0,237774	0,238055	0,238149	0,238055	0,237774	0,23731	0,236696	0,236005
		40	0,236005	0,237761	0,239367	0,240607	0,241368	0,241623	0,241368	0,240607	0,239367	0,237761	0,236005
		50	0,236005	0,240137	0,24414	0,247353	0,249376	0,25006	0,249376	0,247353	0,24414	0,240137	0,236005
		60	0,236005	0,24518	0,255005	0,263418	0,268919	0,27081	0,268919	0,263418	0,255005	0,24518	0,236005
		70	0,236005	0,256105	0,281304	0,304899	0,320978	0,326584	0,320978	0,304899	0,281304	0,256105	0,236005
		80	0,236005	0,284696	0,360462	0,435329	0,484651	0,501197	0,484651	0,435329	0,360462	0,284696	0,236005
		90	0,236005	0,419021	0,693919	0,836705	0,887508	0,900025	0,887508	0,836705	0,693919	0,419021	0,236005
		100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

III.3. Keluaran (*Output*) Pada Penerapan Program Aliran untuk Proses *Imbibition* untuk Jenis Tanah Non Homogen

TMax	Iter	nT	Sr	porositas	dx	dz	Ks	n	a
2000	50	400	0,2	0,35	10	10	0,02	4	0,028

t = 2000

dt = 9,987549

S(x,z)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005	0,236005
10	0,236005	0,236054	0,23608	0,236074	0,236047	0,236035	0,236047	0,236074	0,23608	0,236054	0,236005
20	0,236005	0,23617	0,23626	0,236231	0,236121	0,236081	0,236121	0,236231	0,23626	0,23617	0,236005
30	0,236005	0,236486	0,236753	0,236648	0,23624	0,236131	0,23624	0,236648	0,236753	0,236486	0,236005
40	0,236005	0,237306	0,238076	0,237779	0,236255	0,236088	0,236255	0,237779	0,238076	0,237306	0,236005
50	0,236005	0,239302	0,241536	0,241127	0,237124	0,236658	0,237124	0,241127	0,241536	0,239302	0,236005
60	0,236005	0,243913	0,250487	0,25143	0,242837	0,241777	0,242837	0,25143	0,250487	0,243913	0,236005
70	0,236005	0,254526	0,274766	0,287476	0,288306	0,288373	0,288306	0,287476	0,274766	0,254526	0,236005
80	0,236005	0,282655	0,349546	0,405229	0,431714	0,438917	0,431714	0,405229	0,349546	0,282655	0,236005
90	0,236005	0,415425	0,677319	0,810263	0,85524	0,86582	0,85524	0,810263	0,677319	0,415425	0,236005
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

IV.1. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Jarak Antar Nodal Pada Arah Sumbu X (Δx)

Gambar 4.2 merupakan grafik yang menyatakan hubungan antara saturasi (pada sumbu vertikal) terhadap waktu (pada sumbu horizontal) pada koordinat nodal (30 ; 30) untuk $T_{Max} = 200$ menit. Pada grafik tersebut terdapat 4 (empat) buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva saturasi terhadap waktu untuk nilai $\Delta x = 5$ cm;
2.  merupakan kurva saturasi terhadap waktu untuk nilai $\Delta x = 7,5$ cm;
3.  merupakan kurva saturasi terhadap waktu untuk nilai $\Delta x = 10$ cm;
4.  merupakan kurva saturasi terhadap waktu untuk nilai $\Delta x = 15$ cm.

Pada kurva 1 ketika $T = 0$ menit, nilai saturasinya adalah mendekati nilai saturasi residual yaitu sebesar 0,238, kemudian nilai saturasi terus naik hingga pada $T = 2$ menit nilai saturasinya sebesar 0,239. Kenaikan yang cukup tajam terjadi pada $T = 2$ menit hingga $T = 8$ menit, dimana pada $T = 8$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,273. Kemudian selanjutnya nilai saturasi mengalami kenaikan yang landai hingga pada $T = 50$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,295 dan pada $T = 200$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,332.

Pada kurva 2 ketika $T = 0$ menit, nilai saturasinya adalah mendekati nilai saturasi residual yaitu sebesar 0,238, kemudian nilai saturasi terus naik hingga pada $T = 2$ menit nilai saturasinya sebesar 0,239. Kenaikan yang cukup tajam terjadi pada $T = 2$ menit hingga $T = 9,68$ menit, dimana pada $T = 8$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,274 dan pada $T = 9,68$ nilai saturasinya adalah sebesar 0,294. Kemudian selanjutnya nilai saturasi mengalami kenaikan yang landai hingga pada $T = 50$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,321 dan pada $T = 200$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,368.

Pada kurva 3 ketika $T = 0$ menit, nilai saturasinya adalah mendekati nilai saturasi residual yaitu sebesar 0,238, kemudian nilai saturasi terus naik hingga pada $T = 2$ menit nilai saturasinya sebesar 0,239. Kenaikan yang cukup tajam terjadi pada $T = 2$ menit hingga $T = 11,52$ menit, dimana pada $T = 8$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,275 dan pada $T = 11,52$ nilai saturasinya adalah sebesar 0,332. Kemudian selanjutnya nilai saturasi mengalami kenaikan yang

landai hingga pada $T = 50$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,373 dan pada $T = 200$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,454.

Pada kurva 3 ketika $T = 0$ menit, nilai saturasinya adalah mendekati nilai saturasi residual yaitu sebesar 0,238, kemudian nilai saturasi terus naik hingga pada $T = 2$ menit nilai saturasinya sebesar 0,239. Kenaikan yang cukup tajam terjadi pada $T = 2$ menit hingga $T = 11,52$ menit, dimana pada $T = 8$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,275 dan pada $T = 11,52$ nilai saturasinya adalah sebesar 0,329. Namun pada $T = 13,52$ menit nilai saturasi turun hingga sebesar 0,233 dan seterusnya terjadi kenaikan yang tajam hingga $T = 18$ menit, dimana pada $T = 18$ menit nilai saturasinya sebesar 0,298. Kemudian selanjutnya nilai saturasi mengalami kenaikan yang landai hingga pada $T = 50$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,315 dan pada $T = 200$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,358.

IV.2. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Waktu untuk Setiap Kali Putaran (*Loop*) Komputasi

Gambar 4.3 merupakan grafik yang menyatakan hubungan antara saturasi (pada sumbu vertikal) terhadap waktu (pada sumbu horizontal) pada koordinat nodal (30 ; 30) untuk $T_{Max} = 200$ menit. Pada gambar tersebut terdapat 4 buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva saturasi terhadap waktu untuk nilai $nT = 20$;
2.  merupakan kurva saturasi terhadap waktu untuk nilai $nT = 30$;
3.  merupakan kurva saturasi terhadap waktu untuk nilai $nT = 50$;
4.  merupakan kurva saturasi terhadap waktu untuk nilai $nT = 40$.

Pada kurva 1 ketika $T = 0$ menit nilai saturasinya mendekati nilai saturasi residual yaitu sebesar 0,238395. Akan tetapi pada kurva 1 ini, hingga $T = 200$ menit nilai saturasinya tidak terjadi perubahan yakni sebesar 0,238395. Pada kurva 2 ketika $T = 0$ menit nilai saturasinya mendekati nilai saturasi residual yakni sebesar 0,238395. Kemudian hingga $T = 50$ menit terjadi kenaikan yang cukup tajam, dimana untuk $T = 50$ menit, nilai saturasinya sebesar 0,238409. Selanjutnya nilai saturasi terus naik, sampai pada $T = 200$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,238422.

Pada kurva 3 ketika $T = 0$ menit nilai saturasinya mendekati nilai saturasi residual yakni sebesar 0,238395. Kemudian hingga $T = 8$ menit terjadi kenaikan yang cukup tajam, dimana untuk $T = 8$ menit, nilai saturasinya sebesar 0,238405. Selanjutnya nilai saturasi terus naik, sampai pada $T = 200$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,238437. Pada kurva 4 ketika $T = 0$ menit nilai saturasinya mendekati nilai saturasi residual yakni sebesar 0,238395. Selanjutnya nilai saturasi terus naik, sampai pada $T = 200$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,238409.

IV.3. Analisa Pengujian Terhadap Pengaruh Kemampuan Mensimulasi Paramater Model

Pada gambar 4.4 menunjukkan perbandingan *output* yang dihasilkan pada setiap pengujian. Pada gambar tersebut terdapat 5 buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva yang menunjukkan nilai tinggi tekanan kapiler sebesar 100 cm dengan nilai *saturated conductivity* sebesar 0,002 cm/menit untuk $T_{Max} = 6000$ menit dan $nT = 500$;
2.  merupakan kurva yang menunjukkan nilai tinggi tekanan kapiler sebesar 1000 cm dengan nilai *saturated conductivity* sebesar 0,6 cm/menit untuk $T_{Max} = 3000$ menit dan $nT = 1000$;
3.  merupakan kurva yang menunjukkan nilai tinggi tekanan kapiler sebesar 250 cm dengan nilai *saturated conductivity* sebesar 0,05 cm/menit untuk $T_{Max} = 3000$ menit dan $nT = 1000$;
4.  merupakan kurva yang menunjukkan nilai tinggi tekanan kapiler sebesar 250 cm dengan nilai *saturated conductivity* sebesar 0,05 cm/menit untuk $T_{Max} = 6000$ menit dan $nT = 2000$;
5.  merupakan kurva yang menunjukkan nilai tinggi tekanan kapiler sebesar 50 cm dengan nilai *saturated conductivity* sebesar 6×10^{-5} cm/menit untuk $T_{Max} = 50.000$ menit dan $nT = 1000$;

Pada kurva 1 menunjukkan bahwa pada saat $T = 0$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar 0,236. Nilai ini mendekati nilai saturasi residualnya yakni sebesar 0,20. Kemudian terjadi kenaikan yang cukup landai pada kurva hingga $T = 1500$ menit, dengan nilai saturasinya adalah sebesar 0,2364. Setelah itu nilai saturasinya

naik dengan cukup drastis, hingga ketika $T = 6000$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,2551.

Hal yang sama terjadi pada kurva-kurva selanjutnya. Pada kurva 2 menunjukkan untuk $T = 0$ menit nilai saturasinya mendekati nilai saturasi residualnya yakni sebesar 0,200036. Nilai saturasi ini terus naik hingga pada $T = 3000$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar 0,200053. Kenaikan yang terjadi pada kurva 2 tidak besar, karena pada kurva ini menggunakan nilai tinggi tekanan kapiler yang terlalu besar, serta dengan waktu perhitungan maksimum yang singkat. Sehingga bentuk kurva pada gambar 4.4, terlihat seperti garis lurus.

Pada kurva 3 dan 4 menggunakan tinggi tekanan kapiler yang sama yakni sebesar 250 cm. Akan tetapi, waktu pengamatan maksimum dan saturasi residual yang digunakannya berbeda. Pada kurva 3, waktu pengamatan maksimum yang digunakan adalah selama 3000 menit dengan nilai saturasi residualnya sebesar 0,15. Sedangkan pada kurva 4, waktu pengamatan maksimum yang digunakan adalah selama 6000 menit dengan nilai saturasi residualnya adalah sebesar 0,20. Pada kurva 3, ketika $T = 0$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,152477. Nilai saturasi ini hampir sama hingga $T = 500$ menit. Setelah itu terjadi kenaikan nilai saturasi, hingga pada $T = 3000$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar 0,153859. Pada kurva 4, ketika $T = 0$ menit nilai saturasinya adalah sebesar 0,202332. Nilai saturasi ini hampir sama hingga $T = 500$ menit. Setelah itu terjadi kenaikan nilai saturasi yang cukup tajam hingga $T = 4000$ menit dengan nilai saturasinya sebesar 0,20391. Setelah itu hingga $T = 6000$ menit, kenaikan yang terjadi cukup landai dengan nilai saturasi ketika $T = 6000$ menit = 0,204038.

Pada kurva 5 menunjukkan nilai saturasi ketika $T = 0$ menit cukup berbeda dengan nilai saturasi residualnya. Dimana nilai saturasi residualnya adalah sebesar 0,20 sedangkan nilai saturasinya adalah sebesar 0,445103. Hal ini disebabkan karena nilai tinggi tekanan kapiler yang digunakan terlalu kecil. Setelah itu terjadi kenaikan yang landai hingga $T = 10.125$ menit dengan nilai saturasi pada saat itu adalah sebesar 0,445872. Kemudian kenaikan yang terjadi menjadi lebih tajam hingga ketika $T = 50.000$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar 0,53.

IV.4. Pengujian Insensivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Waktu untuk Setiap Kali Putaran (*Loop*) Komputasi

Gambar 4.5 menunjukkan grafik saturasi terhadap waktu pada berbagai nT untuk $T_{Max} = 50.000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi. Pada grafik tersebut terdapat 3 buah kurva, yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap waktu dengan jumlah *loop* komputasi sebesar $(nT) = 500$;
2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap waktu dengan jumlah *loop* komputasi sebesar $(nT) = 1000$;
3.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap waktu dengan jumlah *loop* komputasi sebesar $(nT) = 1500$.

Dapat dilihat pada kurva 1, pada $T = 0,2$ menit nilai saturasinya adalah sebesar $0,445103$. Kemudian terjadi kenaikan yang landai hingga $T = 2508,8$ menit dengan nilai saturasinya adalah $0,456425$. Setelah itu nilai saturasi naik cukup drastis hingga $T = 30.420$ menit, pada saat itu nilai saturasinya adalah sebesar $0,76504$. Kemudian nilai saturasi naik dengan cukup landai hingga $T = 47.824,199$ menit. Pada $T = 47.824,199$ menit program tidak dapat melanjutkan perhitungan karena terjadi *error* pada program sehingga program tidak menjalankan perhitungan hingga mencapai T maksimum sebesar 50.000 menit. Pada saat $T = 47.824,199$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar $0,805027$.

Hal yang sama juga ditunjukkan pada kurva 2 dan 3. Pada kurva 2, untuk $T = 0,05$ menit nilai saturasinya adalah sebesar $0,445103$. Kemudian terjadi kenaikan yang landai hingga $T = 2508,8$ menit dengan nilai saturasinya adalah $0,45649$. Setelah itu nilai saturasi naik cukup drastis hingga $T = 30.576,2$ menit, pada saat itu nilai saturasinya adalah sebesar $0,765625$. Kemudian nilai saturasi naik dengan cukup landai hingga $T = 50.000$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar $0,807898$.

Pada kurva 3, untuk $T = 0,02$ menit nilai saturasinya adalah sebesar $0,445103$. Kemudian terjadi kenaikan yang landai hingga $T = 2508,8$ menit dengan nilai saturasinya adalah $0,456512$. Setelah itu nilai saturasi naik cukup drastis hingga $T = 30.005,42$ menit, pada saat itu nilai saturasinya adalah sebesar

0,763489. Kemudian nilai saturasi naik dengan cukup landai hingga $T = 50.000$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar 0,807891.

IV.5. Pengujian Insensitivitas Model Terhadap Pemilihan Nilai Selisih Jarak Antar Nodal Pada Arah Sumbu X (Δx)

Pada gambar 4.6 menunjukkan grafik saturasi terhadap waktu pada berbagai selisih jarak (Δx) dengan T Maksimum = 50.000 menit. Pada grafik tersebut terdapat 3 buah kurva, yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap waktu dengan nilai $\Delta x = 5$ cm dan $\Delta z = 5$ cm;
2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap waktu dengan nilai $\Delta x = 10$ cm dan $\Delta z = 10$ cm;
3.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap waktu dengan nilai $\Delta x = 20$ cm dan $\Delta z = 10$ cm.

Pada kurva 1 memperlihatkan bahwa ketika $T = 0,05$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar 0,445103. Kemudian nilai saturasi naik perlahan hingga ketika $T = 5024,45$ menit, dengan nilai saturasinya adalah sebesar 0,445571. Setelah itu nilai saturasi naik dengan cukup drastis hingga $T = 50.000$ menit. Dimana pada saat itu nilai saturasinya adalah 0,61177.

Hal yang sama juga ditunjukkan pada kurva 2 dan 3. Pada kurva 2 memperlihatkan bahwa ketika $T = 0,05$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar 0,445103. Kemudian nilai saturasi naik perlahan hingga ketika $T = 5024,45$ menit, dengan nilai saturasinya adalah sebesar 0,44811. Setelah itu nilai saturasi naik dengan cukup drastis hingga $T = 50.000$ menit. Dimana pada saat itu nilai saturasinya adalah 0,620753.

Pada kurva 3 memperlihatkan bahwa ketika $T = 0,05$ menit, nilai saturasinya adalah sebesar 0,445103. Kemudian nilai saturasi naik perlahan hingga ketika $T = 5024,45$ menit, dengan nilai saturasinya adalah sebesar 0,448064. Setelah itu nilai saturasi naik dengan cukup drastis hingga $T = 50.000$ menit. Dimana pada saat itu nilai saturasinya adalah 0,612021.

IV.6. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai *Saturated Conductivity*

Pada gambar 4.7 merupakan grafik saturasi terhadap kedalaman dengan waktu perhitungan maksimum selama 50.000 menit. Pada grafik tersebut terdapat 4 buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai *saturated conductivity* sebesar 0,006 cm/menit;
2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai *saturated conductivity* sebesar 0,0006 cm/menit;
3.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai *saturated conductivity* sebesar 0,00006 cm/menit;
4.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai *saturated conductivity* sebesar 0,00003 cm/menit.

Pada kurva 1 dapat dilihat pada kedalaman 0 cm, nilai saturasinya sama dengan 1, hal ini menunjukkan bahwa tanah berada pada kondisi jenuh. Kemudian pada kedalaman 0 sampai 10 cm perlahan nilai saturasi turun, dan penurunan nilai saturasi yang drastis terjadi pada kedalaman 10 cm hingga kedalaman 80 cm, sampai akhirnya nilai saturasi berada pada nilai 0,4451 pada kedalaman 100 cm. Penurunan nilai saturasi yang drastis seperti yang ditunjukkan pada kedalaman 10-80 cm merupakan garis basah (*wetting front*) yang merupakan batas antara tanah tanah basah dan tanah kering. Bentuk lancip pada garis basah ini disebabkan oleh adanya penurunan nilai *hydraulic conductivity*, yang merupakan karakteristik pada lapisan tak jenuh air.

Pola yang sama juga terjadi pada kurva 2,3 dan 4. Hanya saja masing-masing kurva ini mempunyai kedalaman jenuh yang berbeda-beda. Dimana pada kurva 2 memiliki kedalaman jenuh hingga kedalaman 90 cm sedangkan pada kurva 3 memiliki kedalaman jenuh sampai kedalaman 40 cm dan pada kurva 4 memiliki kedalaman jenuh sampai kedalaman 30 cm. Jika dibandingkan untuk setiap kurva, maka pada kurva 2 memiliki kedalaman jenuh yang lebih besar dibandingkan dengan kurva yang lainnya.

Pada gambar 4.8 merupakan grafik saturasi terhadap waktu dengan waktu perhitungan maksimum selama 50.000 menit. Pada grafik tersebut terdapat 4 buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai *saturated conductivity* sebesar 0,006 cm/menit;
2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai *saturated conductivity* sebesar 0,0006 cm/menit;
3.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai *saturated conductivity* sebesar 0,00006 cm/menit;
4.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai *saturated conductivity* sebesar 0,00003 cm/menit.

Pada kurva 1 menunjukkan bahwa proses perhitungan terhenti pada saat $T = 1296,05$ menit. Hal yang sama juga ditunjukkan pada kurva 2, dimana proses perhitungan terhenti pada saat $T = 21.582,45$ menit. Akan tetapi hal itu tidak terjadi pada kurva 4 yang mempunyai nilai *saturated conductivity* kurang dari 0,00006 cm/menit. Hal ini menunjukkan bahwa untuk nilai $h_c = 50$ cm dengan waktu perhitungan maksimum selama 50.000 menit dan jumlah putaran *loop* komputasi sebanyak 1000 putaran, agar **Program Aliran Skema Runge Kutta** dapat berjalan dengan baik maka nilai $K_s \leq 0,00006$ cm/menit.

IV.7. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai Saturasi Residual

Gambar 4.9. merupakan grafik antara nilai saturasi terhadap kedalaman tanah pada saat $T = 2000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi telah berlangsung. Pada grafik tersebut terdapat 3 buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai saturasi residual sebesar 0,3;
2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai saturasi residual sebesar 0,25;
3.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai saturasi residual sebesar 0,2.

Pada kurva 1 dapat dilihat pada kedalaman 0 cm, nilai saturasinya sama dengan 1, hal ini menunjukkan bahwa tanah berada pada kondisi jenuh. Kemudian pada kedalaman 0 sampai 10 cm perlahan nilai saturasi turun, dan penurunan nilai saturasi yang drastis terjadi pada kedalaman 10 cm hingga kedalaman 60 cm, sampai akhirnya nilai saturasi akan mendekati nilai saturasi residual pada kedalaman 100 cm. Penurunan nilai saturasi yang drastis seperti yang ditunjukkan pada kedalaman 10-60 cm merupakan garis basah (*wetting front*) yang merupakan batas antara tanah tanah basah dan tanah kering. Bentuk lancip pada garis basah ini disebabkan oleh adanya penurunan nilai *hydraulic conductivity*, yang merupakan karakteristik pada lapisan tak jenuh air.

Pola yang sama juga terjadi pada kurva 2 dan 3, hal ini dapat dilihat pada kedalaman jenuh pada kurva 2 dan 3. Namun, ada perbedaan pada ketiga kurva tersebut, yaitu dalam hal nilai saturasi pada kedalaman berikutnya. Dimana pada kurva 1 memiliki nilai saturasi yang lebih besar dari kurva 2, dan kurva 2 mempunyai nilai saturasi yang lebih besar dari kurva 3. Hal ini disebabkan karena pada kurva 1 mempunyai nilai saturasi residual yang lebih besar dari kurva 2 dan 3, dan kurva 2 mempunyai nilai saturasi residual yang lebih besar dari kurva 3.

IV.8. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai n

Gambar 4.10. merupakan grafik antara nilai saturasi terhadap kedalaman tanah pada saat $T = 2000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi telah berlangsung. Pada grafik tersebut terdapat buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai $n = 3$;
2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai $n = 4$;
3.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai $n = 5$.

Pada kurva 1 terlihat bahwa terjadi penurunan nilai saturasi setelah tanah dalam keadaan jenuh. Pada kedalaman 0 sampai 10 cm penurunan yang terjadi tidak begitu tajam. Penurunan yang tajam terjadi pada kedalaman 10 sampai 20 cm, pada kedalaman 20 sampai 30 cm tanah mengalami penurunan nilai saturasi

yang lebih tajam pada penurunan sebelumnya. Kemudian pada kedalaman selanjutnya, kurva mengalami penurunan nilai saturasi, namun tidak mencapai nilai saturasi residual ($Sr = 0.2$). Saturasi pada kedalaman 100 cm adalah sebesar 0,299 yang merupakan nilai akhir pada kurva ini.

Pada kurva 2 terlihat bahwa terjadi penurunan nilai saturasi setelah tanah dalam kondisi jenuh keadaan jenuh. Penurunan ini cukup tajam pada kedalaman 0 sampai 10 cm. Penurunan yang tajam terjadi pada kedalaman 10 sampai 20 cm. Kemudian pada kedalaman selanjutnya, kurva mengalami penurunan nilai saturasi, namun tidak mencapai nilai saturasi residual ($Sr = 0.2$). Saturasi pada kedalaman 100 cm adalah sebesar 0,236 yang merupakan nilai akhir pada kurva ini.

Pada kurva 3 terlihat bahwa terjadi penurunan nilai saturasi setelah tanah dalam kondisi jenuh keadaan jenuh. Penurunan ini yang tajam pada kedalaman 0 sampai 10 cm. Pada kedalaman 10 sampai 20 cm, penurunan yang tajam pada nilai saturasi juga terjadi tetapi tidak setajam pada penurunan yang pertama. Kemudian pada kedalaman selanjutnya, kurva mengalami penurunan nilai saturasi, namun tidak mencapai nilai saturasi residual ($Sr = 0.2$). Saturasi pada kedalaman 100 cm adalah sebesar 0,213 yang merupakan nilai akhir pada kurva ini.

IV.9. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai a

Gambar 4.11. merupakan grafik antara nilai saturasi terhadap kedalaman tanah pada saat $T = 2000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi telah berlangsung. Pada grafik tersebut terdapat buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai $a = 0,02$;
2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai $a = 0,028$;
3.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai $a = 0,03$.

Pada kurva 1 terlihat bahwa tanah berada dalam keadaan jenuh pada kedalaman 0 sampai 10 cm, kemudian terjadi penurunan nilai saturasi setelah

tanah dalam keadaan jenuh. Pada kedalaman 10 sampai 20 cm penurunan yang terjadi tidak begitu tajam. Penurunan yang tajam terjadi pada kedalaman 20 sampai 30 cm. Kemudian pada kedalaman selanjutnya, kurva mengalami penurunan nilai saturasi, namun tidak mencapai nilai saturasi residual ($S_r = 0.2$). Saturasi pada kedalaman 100 cm adalah sebesar 0,296 yang merupakan nilai akhir pada kurva ini.

Pada kurva 2 terlihat bahwa tanah terjadi penurunan nilai saturasi setelah tanah dalam kondisi jenuh keadaan jenuh. Pada kedalaman 0 sampai 10 cm penurunan yang terjadi tidak begitu tajam. Penurunan yang tajam terjadi pada kedalaman 10 sampai 20 cm, pada kedalaman 20 sampai 30 cm tanah mengalami penurunan nilai saturasi yang lebih tajam pada penurunan sebelumnya. Kemudian pada kedalaman selanjutnya, kurva mengalami penurunan nilai saturasi, namun tidak mencapai nilai saturasi residual ($S_r = 0.2$). Saturasi pada kedalaman 100 cm adalah sebesar 0,236 yang merupakan nilai akhir pada kurva ini.

Pada kurva 3 terlihat bahwa tanah terjadi penurunan nilai saturasi setelah tanah dalam keadaan jenuh. Pada kedalaman 0 sampai 10 cm penurunan yang terjadi tidak begitu tajam. Penurunan yang tajam terjadi pada kedalaman 10 sampai 20 cm, pada kedalaman 20 sampai 30 cm tanah mengalami penurunan nilai saturasi yang lebih tajam pada penurunan sebelumnya. Kemudian pada kedalaman selanjutnya, kurva mengalami penurunan nilai saturasi, namun tidak mencapai nilai saturasi residual ($S_r = 0.2$). Saturasi pada kedalaman 100 cm adalah sebesar 0,229 yang merupakan nilai akhir pada kurva ini.

IV.10. Pengujian Terhadap Kemampuan Mensimulasi Pengaruh Nilai Porositas

Gambar 4.12. merupakan grafik antara nilai saturasi terhadap kedalaman tanah pada saat $T = 2000$ menit, dimana T menunjukkan lamanya proses infiltrasi telah berlangsung. Pada grafik tersebut terdapat 3 buah kurva yaitu sebagai berikut:

1.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai porositas sebesar 0,35;
2.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai porositas sebesar 0,50;

3.  merupakan kurva hubungan saturasi terhadap kedalaman pada nilai porositas sebesar 0,70.

Pada kurva 1 dapat dilihat pada kedalaman 0 cm, nilai saturasinya sama dengan 1, hal ini menunjukkan bahwa tanah berada pada kondisi jenuh. Kemudian pada kedalaman 0 sampai 10 cm perlahan nilai saturasi turun, dan penurunan nilai saturasi yang drastis terjadi pada kedalaman 10 cm hingga kedalaman 60 cm, sampai akhirnya nilai saturasi akan mendekati nilai saturasi residual pada kedalaman 100 cm. Penurunan nilai saturasi yang drastis seperti yang ditunjukkan pada kedalaman 10-60 cm merupakan garis basah (*wetting front*) yang merupakan batas antara tanah tanah basah dan tanah kering. Bentuk lancip pada garis basah ini disebabkan oleh adanya penurunan nilai *hydraulic conductivity*, yang merupakan karakteristik pada lapisan tak jenuh air.

Pola yang sama juga terjadi pada kurva 2 dan 3, hal ini dapat dilihat pada kedalaman jenuh pada kurva 2 dan 3. Namun, ada perbedaan pada ketiga kurva tersebut, yaitu dalam hal nilai saturasi pada kedalaman berikutnya. Dimana pada kurva 1 memiliki nilai saturasi yang lebih besar dari kurva 2, dan kurva 2 mempunyai nilai saturasi yang lebih besar dari kurva 3. Hal ini disebabkan karena pada kurva 1 mempunyai nilai porositas yang lebih kecil dari kurva 2 dan 3, dan kurva 2 mempunyai nilai porositas yang lebih kecil dari kurva 3.

Petunjuk Penggunaan Program Aliran Skema Runge Kutta

oleh, Firman Reza Persada (0606072250)

Program Aliran Skema Runge Kutta ini merupakan suatu model komputer yang dapat mensimulasikan aliran air tanah pada lapisan tak jenuh air. Model komputer ini dikembangkan berdasarkan Formulasi Richards dengan menggunakan Metode Beda Hingga, dimana solusi numeriknya diselesaikan dengan menggunakan Metode Runge Kutta Orde 4. Pada karya tulis ini terdapat dua program aliran, yaitu:

1. Program Aliran Skema Runge Kutta v.1.1, yang memberikan keluaran (*output*) berupa nilai saturasi, dan
2. Program Aliran Skema Runge Kutta v.1.2, yang memberikan keluaran (*output*) berupa nilai saturasi dan tinggi tekanan kapiler.

Dalam menggunakan metode ini, penulis menggunakan batasan-batasan sebagai berikut:

1. sebagai kondisi awal (*initial condition*) diasumsikan nilai-nilai *capillary pressure head* pada $t = 0$ diasumsikan pada saat kering, nilai ini juga dapat disesuaikan dengan kondisi yang ada di lapangan;
2. adanya suatu nilai *capillary pressure head* yang konstan sepanjang waktu yang terletak disekeliling profil yang sedang ditinjau dan berfungsi sebagai kondisi batas (*boundary condition*) agar sistem persamaan dapat dicari solusi terbaiknya.

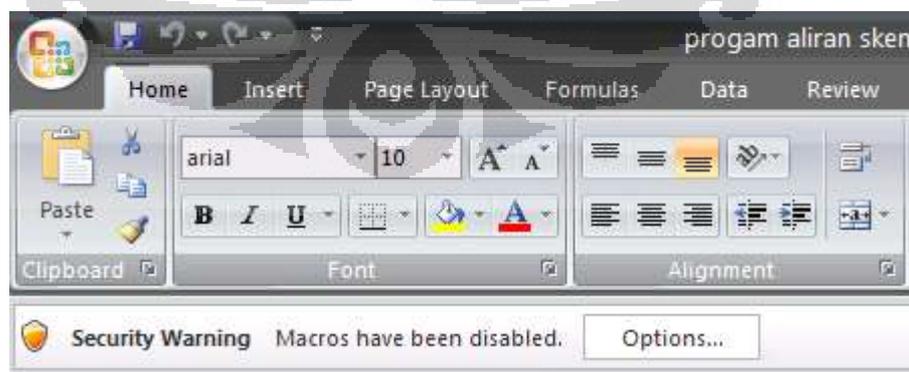
Parameter-parameter yang digunakan sebagai data masukan dalam program model aliran air tanah ke lapisan tak jenuh air dari suatu badan air permukaan adalah sebagai berikut :

- 1) T_{max} ; merupakan parameter waktu maksimum yang berfungsi untuk menghentikan proses perhitungan bila jumlah kumulatif interval waktu telah mencapai nilai maksimum . Satuannya adalah menit, akan tetapi dapat disesuaikan berdasarkan keinginan pemodel berdasarkan nilai *saturated conductivity*,

- 2) nT ; merupakan parameter yang membuat harga selisih waktu (Δt) untuk setiap *looping* perhitungan menjadi semakin besar untuk *looping* berikutnya.
- 3) n ; merupakan parameter yang menunjukkan besarnya konstanta kelengkungan grafik saturasi terhadap kedalaman tanah yang ditinjau.
- 4) a ; merupakan parameter berupa konstanta yang menentukan letak *critical capillary head* terhadap kedalaman tanah yang ditinjau.
- 5) K_s ; merupakan parameter konduktivitas jenuh (*saturated conductivity*) dalam satuan cm/menit.
- 6) S_r ; adalah singkatan dari saturasi residual, merupakan parameter yang menunjukkan jumlah air yang tetap berada pada pori-pori tanah pada *capillary pressure* yang sangat tinggi.
- 7) P_i ; merupakan parameter yang menunjukkan perbandingan antara volume pori dengan volume total tanah yang ditinjau (porositas tanah).

Langkah-langkah penggunaan Program Aliran Skema Runge Kutta ini adalah sebagai berikut:

1. Buka file Program Aliran Skema Runge Kutta v.1.1 atau Program Aliran Skema Runge Kutta v.1.2, file berbentuk .xls atau .xslm .
2. Setelah file dibuka, maka akan muncul tampilan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tekan *Options...*, lalu klik *Enable this content*, tekan *OK*.



Gambar 1: Tampilan ketika Program Aliran Skema Runge Kutta dibuka

3. Buat matrix ukuran profil tanah yang ditinjau dan menentukan kondisi daerah yang dimodelkan, berupa:
 - a. koordinat-koordinat pada sumbu z yang merepresentasikan kedalaman profil tanah,
 - b. koordinat-koordinat pada sumbu x yang merepresentasikan jarak memanjang profil tanah,
 - c. nilai *capillary pressure head* awal sebagai *initial condition*, *boundary condition*, dan nilai *saturated conductivity* untuk setiap lapisan tanah tersebut.

Sebagai contoh, pada Program Aliran ini menggunakan matrix ukuran 11 x 11 seperti ditunjukkan pada Gambar 2, ukuran matrix ini nantinya dapat disesuaikan berdasarkan keinginan pemodel.

4. Memasukkan nilai data-data parameter yang dibutuhkan sesuai kolom yang tersedia pada *sheet "input"* seperti ditunjukkan pada Gambar 2, dimana setiap data parameter harus mempunyai satu nilai.

PROGRAM ALIRAN SKEMA RUNGE KUTTA

INPUT DATA PARAMETER

Sr 0,1
 a 0,025
 n 4
 P1 0,55
 Tmax 2000 menit
 nT 400

initial condition

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

boundary condition

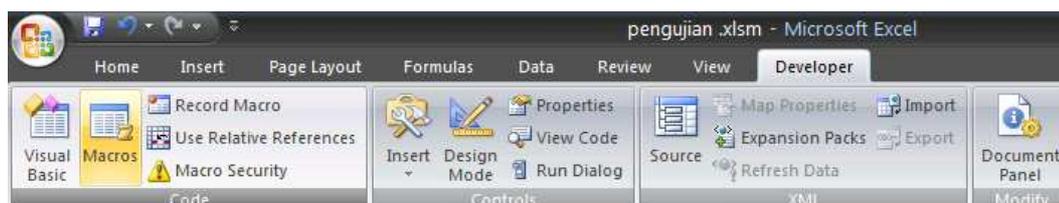
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100										100
20	100										100
30	100										100
40	100										100
50	100										100
60	100										100
70	100										100
80	100										100
90	100										100
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

saturated conductivity (cm/menit)

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
10	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
30	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
40	0,02	0,02	0,02	0,02	0,001	0,001	0,001	0,02	0,02	0,02	0,02
50	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
60	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,02
70	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
80	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
90	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Gambar 2: Contoh Masukan (*Input*) Data Parameter

5. Setelah data-data parameter sudah dilengkapi, maka program aliran siap dijalankan, caranya adalah dengan pilih *Tab Developer*, pilih *Macros*, lalu pilih *Run*. Pastikan *Macro Name* adalah "mulai", seperti ditunjukkan pada gambar 3 dan gambar 4. Apabila *Tab Developer* belum tersedia, tekan , pilih *Excel Options*, lalu klik "show developer tab in the ribbon".



Gambar 3: Tampilan Menu pada *Microsoft Excel 2007*



Gambar 4: Tampilan Pada Form *Macro*

6. Setelah itu, maka akan keluar suatu kotak dialog (*dialog box*), lengkapi data-data parameter pada kotak dialog tersebut, seperti Parameter, Ks, kondisi awal, kondisi batas, koordinat z, dan koordinat x. Lalu tentukan letak dimana tempat keluaran program, misalnya pada *sheet* "output". Tekan *OK* untuk menjalankan program.



Gambar 5: Tampilan pada Kotak Dialog

7. Setelah menyetujui kotak dialog yang menampilkan data parameter yang telah kita buat, maka komputasi akan segera dilakukan. Lamanya

komputasi tergantung oleh besar kecilnya nilai jumlah *loop* komputasi (nT) yang dimasukkan dan banyaknya iterasi yang dilakukan untuk menghasilkan keluaran (*output*)

8. Hasil keluaran (*output*) akan keluar pada *sheet* yang ditentukan sebelumnya. Keluaran yang dihasilkan adalah berupa tabulasi nilai saturasi dan tinggi tekanan kapiler dalam fungsi x dan z untuk setiap interval waktu (t), seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	OUTPUT PROGRAM ALIRAN SKEMA RUNGE KUTTA														
2	by: Firman Reza Persada (Sipil 2006)														
3															
4	TMax	Iter	nT	Sr	porositas	dx	dz	Ks	n	a					
5	2000	50	400	0,2	0,35	10	10	0,02	4	0,028					
6															
7															
8															
9	t =	0,0125	S(x,z)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
10	dt =	0,0125		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11				10	0,238005	0,238007	0,238007	0,238007	0,238007	0,238007	0,238007	0,238007	0,238007	0,238007	0,238005
12				20	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
13				30	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
14				40	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
15				50	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
16				60	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
17				70	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
18				80	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
19				90	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
20				100	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
21															
22	t =	0,05	S(x,z)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
23	dt =	0,0375		0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24				10	0,238005	0,238015	0,238015	0,238015	0,238015	0,238015	0,238015	0,238015	0,238015	0,238015	0,238005
25				20	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
26				30	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
27				40	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
28				50	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
29				60	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
30				70	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
31				80	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
32				90	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005
33				100	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005	0,238005

Gambar 6: Contoh Hasil Keluaran (*output*) Program Aliran Skema Runge Kutta

9. Berdasarkan Tabulasi nilai saturasi yang dihasilkan pada Program Aliran Skema Runge Kutta, maka selanjutnya pemodel dapat membuat grafik hubungan saturasi terhadap kedalaman dan/atau terhadap waktu. Pembuatan grafik ini tidak bisa dilakukan pada program, sehingga nantinya pemodel harus membuat grafik secara manual dengan bantuan *software* lain seperti *Microsoft Excel*.