

1088/FT.01/SKRIP/07/2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**MODEL TRANSPOR PENCEMAR AIR TANAH DUA
DIMENSI MENGGUNAKAN METODE BEDA HINGGA
UNTUK DOMAIN SPASIAL DAN METODE *RUNGE-KUTTA*
ORDE 4 UNTUK DOMAIN TEMPORAL**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**DESY RAHAYU HERTANTI
0806454172**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
KEKHUSUSAN MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Desy Rahayu Hertanti

NPM : 0806454172

Tanda Tangan : 

Tanggal : 25 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Desy Rahayu Hertanti
NPM : 0806454172
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Model Transpor Pencemar Air Tanah Dua Dimensi
Menggunakan Metode Beda Hingga untuk Domain
Spasial dan Metode *Runge-Kutta* Orde 4 untuk
Domain Temporal

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji I : Ir. Siti Murniningsih, M.Sc (.....)

Penguji II : Ir. Ruswan Rasul, M.Si (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan seminar skripsi ini. Penulisan seminar skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan bimbingan dan doa dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

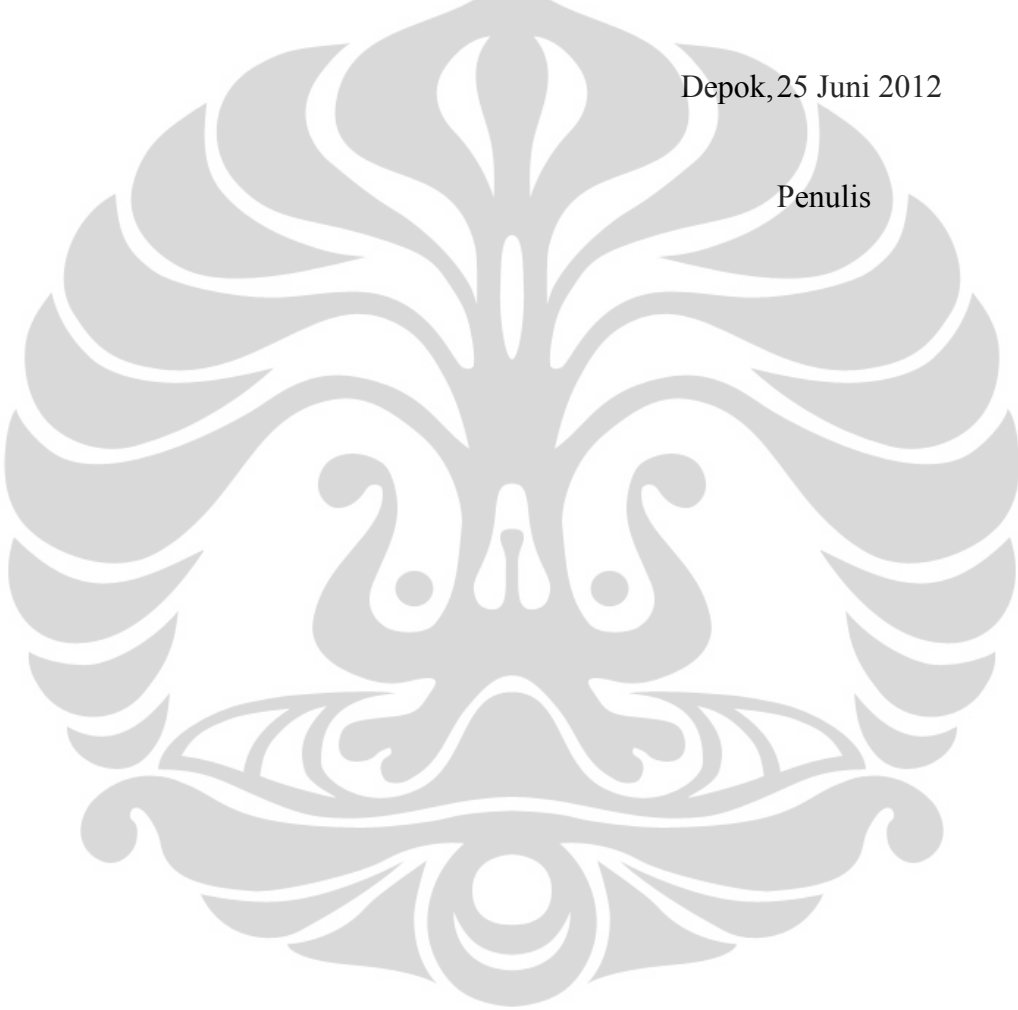
- (1) Bapak Ir. Herr Soeryantono, M.Sc, Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan ilmu, wawasan, dan arahan kepada saya baik dalam penyusunan skripsi ini maupun masa studi;
- (2) Ibu Dr.Ir.Ing Dwita Sutjiningsih Marsudiantoro, Dipl.HE, selaku ketua peminatan Manajemen Sumber Daya Air yang telah memberi ilmu selama saya menempuh pendidikan untuk mendapatkan gelar S1;
- (3) Papa, Mama, Aa Denny, Mbak Devi dan seluruh keluarga saya yang selalu memberikan bantuan dan dukungan materil dan moral sepanjang hidup saya;
- (4) Triananda, Herlambang, dan Ma'ruffi yang menjadi sahabat seperjuangan di peminatan MSDA dan telah membantu baik dalam perkuliahan maupun penyusunan skripsi ini;
- (5) Pak Bagyo dan Mbak Wid yang senantiasa menemani di Lab. Lantai 3;
- (6) Mbak Evi Anggraheni yang menjadi dosen sekaligus teman baik di dalam maupun di luar kampus;
- (7) Ibu Atie yang tak segan berbagi ilmu dan pengalaman serta memberikan dukungan dalam perkuliahan dan penyusunan skripsi ini;
- (8) Aini, Dian, Jenny, Inal, Maisa, Tina, Iyang, dan teman-teman yang senantiasa menemani dan mendukung selama penyusunan skripsi dan masa studi.

- (9) Farisatul Amanah yang menyempatkan waktunya untuk membantu proses edit skripsi.
- (10) Semua teman Sipil dan Lingkungan 2008 yang telah banyak membantu dan memberikan dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu. Amin.

Depok, 25 Juni 2012

Penulis



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

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

Nama : Desy Rahayu Hertanti
NPM : 0806454172
Program Studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

Model Transpor Pencemar Air Tanah Dua Dimensi Menggunakan Metode Beda Hingga untuk Domain Spasial dan Metode Runge-Kutta Orde 4 untuk Domain Temporal


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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 25 Juni 2012

Yang menyatakan



(Desy Rahayu Hertanti)

ABSTRAK

Nama : Desy Rahayu Hertanti
Program Studi : Teknik Sipil
Judul : Model Transpor Pencemar Air Tanah Dua Dimensi Menggunakan Metode Beda Hingga untuk Domain Spasial dan Metode Runge-Kutta Orde 4 untuk Domain Temporal

Transpor pencemar yang terjadi pada dinding bidang kontak antara badan air permukaan dan air tanah didominasi oleh proses adveksi dan dispersi secara dua dimensi. Variabel yang mempengaruhi transpor pencemar adalah kecepatan (V), dispersivitas (α) dan koefisien difusi (D^*). Skripsi ini merupakan pengembangan model transpor pencemar dengan menurunkan persamaan menggunakan metode beda hingga untuk domain spasial dan Runge-Kutta orde 4 untuk domain temporal. Kemudian model diterapkan pada bahasa program Visual Basic untuk Microsoft Excel.

Kata kunci: transpor pencemar air tanah, beda hingga, *Runge-Kutta* orde 4, *Visual Basic*.

ABSTRACT

Name : Desy Rahayu Hertanti
Study Program : Civil Engineering
Title : Pollutant Transport Model in Groundwater Using Finite Difference Method for Spatial Domain and Fourth Order of Runge-Kutta Method for Temporal Domain

Transport of pollutants that occur in the wall of the contact area between surface water and groundwater is dominated by two dimensions of advection and dispersion processes. The variables that govern the pollutant transport are velocity (V), dispersivity (α) and diffusion coefficient (D^*). This thesis develop pollutant transport models by deriving equations using finite difference method for spatial domain and fourth order of Runge-Kutta for temporal domain. Then this model is applied by Visual Basic for Microsoft Excel.

Keywords: pollutant transport in groundwater, finite difference, fourth orde of Runge-Kutta, Visual Basic.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Ruang Lingkup Pembahasan.....	3
1.4 Metode Penulisan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
2 PERSAMAAN UMUM TRANSPOR PENCEMAR.....	5
2.1 Teori Proses Penjalaran Pencemar (<i>Contaminant Transport Process</i>)... 5	5
2.2 Massa dan Konsentrasi	5
2.3 Kuantifikasi Beban Pencemaran pada Badan Air	6
2.4 Proses Adveksi.....	7
2.5 Dispersi Hidrodinamik.....	7
2.6 Hukum Difusi Fick	8
2.7 Persamaan umum Penjalaran Pencemar	8
2.8 Pencemar non-reaktif pada media berpori homogen	11
2.9 Metode Beda Hingga (<i>Finite Difference Method</i>).....	12
2.10 Metode <i>Runge-Kutta</i> Orde 4.....	14
3 PENGEMBANGAN MODEL TRANSPOR PENCEMAR AIR TANAH..	15
3.1 Pengembangan Metode Numerik pada Model Transpor Pencemar Air Tanah Dua Dimensi.....	15
3.1.1 Persamaan Transpor Pencemar dengan Metode Beda Hingga....	15
3.1.2 Persamaan Transpor Pencemar dengan Metode <i>Runge-Kutta</i> Orde 4	16
3.2 Parameter, Kondisi Batas, dan Kondisi Awal Model Transpor Pencemar 17	17
3.2.1 Parameter dan Variabel	18
3.2.2 Kondisi Batas	19
3.2.3 Kondisi Awal (<i>Initial Condition</i>).....	20
3.2.4 Algoritma Penjalanan Program	20
3.3 Aplikasi Program Model Transpor Pencemar.....	22
3.3.1 Aplikasi Model Penyelesaian Metode Numerik (Metode Beda Hingga dan <i>Runge-Kutta</i> Orde 4)	22
3.3.2 Aplikasi Model Penyelesaian Metode Analitik.....	26

3.4	Skenario Penjalanan Program Model Transpor Pencemar	30
4	SIMULASI MODEL TRANSPOR PENCEMAR.....	32
4.1	Verifikasi Model	32
4.1.1	Model Transpor Pencemar Dengan Solusi Analitik.....	33
4.1.2	Model Transpor Pencemar Dengan Solusi Numerik.....	36
4.1.3	Perbandingan Model Transpor Pencemar Solusi Analitik Dengan Solusi Numerik Terhadap Jarak.....	38
4.1.4	Perbandingan Model Transpor Pencemar Solusi Analitik dengan Solusi Numerik Terhadap Waktu.....	42
4.1.5	Pengaruh Parameter dx	45
4.1.6	Pengaruh Parameter dt	47
4.2	Eksperimen Model	48
4.2.1	Eksperimen 1	48
4.2.2	Eksperimen 2.....	56
4.2.3	Eksperimen 3.....	63
4.3	Validasi Model.....	70
4.4	Sensitivitas Model.....	77
4.4.1	Sensitivitas Dispersivitas (α).....	77
4.4.2	Sensitivitas Koefisien Difusi (D^*)	81
4.5	<i>Confidence Belt</i> Nilai Konsentrasi Model Transpor Pencemar untuk Simulasi Eksperimen 1	84
5	PENUTUP.....	87
5.1	Kesimpulan	87
5.2	Saran	88
	DAFTAR REFERENSI	89
	LAMPIRAN	90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kesetimbangan Massa pada Elemen Volume	9
Gambar 2.2. <i>Breakthrough Curve</i>	11
Gambar 2.3. Variasi Konsentrasi Pencemar Akibat Penjalaran.....	12
Gambar 2.4. Penggunaan Grid pada <i>Finite Difference</i>	13
Gambar 2.5. Grafik Fungsi u	13
Gambar 3.1 Ilustrasi kondisi lapangan yang dimodelkan	18
Gambar 3.2. Algoritma Penjalanan Program	21
Gambar 3.3. Tampilan Halaman Muka Model Transpor Pencemar	22
Gambar 3.4. Form Data parameter dan Variabel untuk Penyelesaian Metode Numerik.....	23
Gambar 3.5. Tampilan Halaman Model untuk Penyelesaian Metode Numerik ...	23
Gambar 3.6. Contoh Tampilan Form <i>Ubah Masukan Data</i> untuk Penyelesaian Metode Numerik	24
Gambar 3.7. Tampilan Form <i>Kondisi Awal dan Kondisi Batas</i> untuk Penyelesaian Metode Numerik	25
Gambar 3.8. Contoh Tampilan Form Data Parameter dan Variabel untuk Penyelesaian Metode Analitik	27
Gambar 3.9. Tampilan Halaman Model Tanspor Pencemar untuk Penyelesaian Metode Analitik	27
Gambar 3.10. Tampilan Form <i>Ubah Masukan Data</i> untuk Penyelesaian Metode Analitik.....	28
Gambar 3.11. Tampilan Form <i>Kondisi Awal dan Kondisi Batas</i> untuk Penyelesaian Metode Analitik	29
Gambar 4.1. Tampilan Form Data Parameter Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik	34
Gambar 4.2. Tampilan Grid pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik.....	34
Gambar 4.3. Tampilan Form <i>Kondisi Awal dan Kondisi Batas</i> pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik.....	35
Gambar 4.4. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik.....	35
Gambar 4.5. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik	35
Gambar 4.6. Tampilan Form Data Parameter Simulasi Verifikasi untuk Metode Numerik.....	36
Gambar 4.7. Tampilan Grid pada Simulasi Verifikasi Model untuk	37
Gambar 4.8. Tampilan Form <i>Kondisi Awal dan Kondisi Batas</i> pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik.....	37
Gambar 4.9. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Numerik.....	38
Gambar 4.10. Tampilan Halaman <i>Input Kecepatan X</i> pada Verifikasi Model Transpor Pencemar.....	38
Gambar 4.11. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Numerik	38

Gambar 4.12. Grafik Perbandingan Nilai Konsentrasi Tiap Titik Hasil Metode Analitik dengan Metode Numerik.....	40
Gambar 4.13. Grafik Nilai % <i>Error</i> pada Tiap Titik	42
Gambar 4.14 Konsentrasi Solusi Analitik dengan Numerik pada Saat $t = 20000$ detik.....	43
Gambar 4.15 Konsentrasi Solusi Analitik dengan Numerik pada Saat $t = 40000$ detik.....	44
Gambar 4.16 Konsentrasi Solusi Analitik dengan Numerik pada Saat $t = 60000$ detik.....	44
Gambar 4.17 Konsentrasi Solusi Analitik dengan Numerik pada Saat $t = 80000$ detik.....	45
Gambar 4.18 Nilai % <i>Error</i> Parameter dx Terhadap Jarak (m).....	46
Gambar 4.19. % <i>Error</i> Parameter dt Terhadap Jarak.....	48
Gambar 4.20. Tampilan Form Data Parameter dan Variabel pada Simulasi Ekperimen 1	49
Gambar 4.21. Tampilan Grid pada Simulasi Ekperimen 1	50
Gambar 4.22. Tampilan <i>Input Kecepatan X</i> pada Eksperimen 1	50
Gambar 4.23. Tampilan <i>Input Kecepatan Z</i> pada Eksperimen 1	51
Gambar 4.24. Tampilan Form <i>Kondisi Awal dan Kondisi Batas</i> pada Eksperimen 1.....	51
Gambar 4.25. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Eksperimen 1	52
Gambar 4.26. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 1 saat $t = 500$ detik	53
Gambar 4.27. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 1 saat $t = 600$ detik	54
Gambar 4.28. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 1 saat $t = 700$ detik	55
Gambar 4.29. Tampilan Form Data Parameter dan Variabel pada Simulasi Ekperimen 2	56
Gambar 4.30. Tampilan Grid pada Simulasi Ekperimen 2	57
Gambar 4.31. Tampilan <i>Input Kecepatan X</i> pada Eksperimen 2	57
Gambar 4.32. Tampilan <i>Input Kecepatan Z</i> pada Eksperimen 2	58
Gambar 4.33. Tampilan Form <i>Kondisi Awal dan Kondisi Batas</i> pada Eksperimen 2.....	58
Gambar 4.34. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Eksperimen 2.....	59
Gambar 4.35. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 2 saat $t = 500$ detik	60
Gambar 4.36. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 2 saat $t = 600$ detik	61
Gambar 4.37. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 2 saat $t = 700$ detik	62
Gambar 4.38. Tampilan Form Data Parameter dan Variabel pada Simulasi Ekperimen 3	64
Gambar 4.39. Tampilan Grid pada Simulasi Ekperimen 3	64
Gambar 4.40. Tampilan <i>Input Kecepatan X</i> pada Eksperimen 3	65

Gambar 4.41. Tampilan <i>Input Kecepatan Z</i> pada Eksperimen 3	65
Gambar 4.42. . Tampilan Form <i>Kondisi Awal dan Kondisi Batas</i> pada Eksperimen 3	66
Gambar 4.43. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Eksperimen 3	66
Gambar 4.44. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 3 saat $t = 500$ detik	67
Gambar 4.45(a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 3 saat $t = 600$ detik	68
Gambar 4.46. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 3 saat $t = 700$ detik	69
Gambar 4.47. Tampilan Form Data Parameter dan Variabel pada Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar	71
Gambar 4.48. Tampilan Grid pada Simulasi Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar	71
Gambar 4.49. Tampilan <i>Input Kecepatan X</i> pada Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar	72
Gambar 4.50. Tampilan <i>Input Kecepatan Z</i> pada Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar	72
Gambar 4.51. Tampilan Form <i>Kondisi Awal dan Kondisi Batas</i> pada Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar	73
Gambar 4.52. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar	73
Gambar 4.53. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Validasi saat $t = 50000$ detik	74
Gambar 4.54. Penjalaran Pencemar pada Simulasi Validasi saat $t = 50000$ detik	74
Gambar 4.55. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Validasi saat $t = 60000$ detik	74
Gambar 4.56. Penjalaran Pencemar pada Simulasi Validasi saat $t = 60000$ detik	75
Gambar 4.57. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Validasi saat $t = 70000$ detik	75
Gambar 4.58. Penjalaran Pencemar pada Simulasi Validasi saat $t = 70000$ detik	75
Gambar 4.59. Pola Konsentasi untuk simulasi Validasi pada Model Transpor Pencemar untuk $t = 50000$ detik, 60000 detik, dan 70000 detik	77
Gambar 4.60. Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Sensitivitas α (a) $\alpha = 10,83$ m, (b) $\alpha = 10,1$ m, dan (c) $\alpha = 9,37$ m	79
Gambar 4.61. Sensitivitas α terhadap Konsentrasi pada Sumbu X	80
Gambar 4.62. Sensitivitas α terhadap Konsentrasi pada Sumbu Z	81
Gambar 4.63. Nilai Konsentrasi Tiap Titik Simulasi Sensitivitas D (a) $D = 10^{-12}$, (b) $D = 10^{-10}$, dan (c) $D = 10^{-8}$ (dalam $m^2/detik$)	82
Gambar 4.64. Sensitivitas D terhadap Konsentrasi pada Sumbu X	83
Gambar 4.65. Sensitivitas D terhadap Konsentrasi pada Sumbu Z	84
Gambar 4.66. <i>Confidence Belt</i> Konsentrasi untuk Simulasi Eksperimen 1 pada Sumbu X	85
Gambar 4.67. <i>Confidence Belt</i> Konsentrasi untuk Simulasi Eksperimen 1 pada Sumbu Z	86

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Perbandingan Nilai Konsentrasi Tiap Titik Hasil Metode Analitik dengan Metode Numerik.....	39
Tabel 4.2 Nilai % <i>Error</i> pada Tiap Titik	41
Tabel 4.3. Nilai Konsentrasi Solusi Analitik (dalam mg/L)	42
Tabel 4.4 Nilai Konsentrasi Solusi Numerik (dalam mg/L)	43
Tabel 4.5. Nilai % <i>Error</i> Parameter dx Terhadap Jarak (m).....	46
Tabel 4.6 Nilai % <i>error</i> Parameter dt Terhadap Jarak (m)	47
Tabel 4.7. Perbandingan Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Validasi untuk $t = 50000$ detik, 60000 detik, dan 70000 detik	76
Tabel 4.8. Data Nilai Dispersivitas	78



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan peningkatan populasi penduduk yang tidak merata di Indonesia mengakibatkan banyak pemukiman yang menghasilkan limbah domestik yang berkontribusi pada pencemaran air. Sumber air permukaan, yang berupa danau maupun sungai, yang tercemar dapat mencemari air tanah yang berada di sekitarnya. Masuknya pencemar ke dalam air tanah terhanyut bersama infiltrasi air permukaan ke dalam lapisan air tanah mengikuti mekanisme adveksi dan menyebar lebih jauh mengikuti mekanisme dispersi.

Umumnya penjalaran adveksi pada dinding bidang kontak antara badan air permukaan dengan tanah didominasi oleh gerak transversal, tegak lurus baik terhadap bidang tebing sungai/danau maupun arah aliran sungai, dan gerak vertikal. Gerak infiltrasi didalam tebing yang sejajar dengan arah aliran sungai, dapat dikatakan hampir tidak ada. Dengan demikian, simulasi mekanisme adveksi dan dispersi diatas cukup bila hanya mengakomodasi gerak aliran dua dimensi saja.

Beberapa upaya dilakukan dalam rangka mengendalikan dan mencegah terjadinya pencemaran dari air permukaan ke dalam aliran air tanah seperti dengan pembuatan filter pada tebing sungai/danau. Untuk menganalisa efektivitas dan bagaimana perilaku dari keberadaan filter perlu dilakukan simulasi penyebaran pencemar tersebut. Namun agar tidak membahayakan manusia, simulasi ini dilakukan menggunakan simulator berupa aplikasi komputer yang didasarkan dari penyederhanaan numerik suatu model matematik.

Nyatanya sudah ada aplikasi komputer yang mensimulasikan pencemar pada aliran air tanah menggunakan metode numerik seperti 3DFEMFAT (*3-Dimensional Finite-Element Model of Flow and Transport through Saturated-Unsaturated Media*), AQUA3D (*3-dimensional Finite-Element Groundwater Flow and Transport Model*), AT123D (*Analytical, Transient One-, Two-, and Three-Dimensional Model*), BIOF&T 2-D/3-D (*Biodegradation, Flow and Transport In The Saturated And Unsaturated Zones In Two Or Three*

Dimensions), dan sebagainya. Namun, kecil kemungkinannya dapat terjangkau oleh masyarakat umum di Indonesia karena harga yang sangat mahal. Harga yang sangat mahal disebabkan karena kompleksitas presentasi yang disuguhkan oleh aplikasi komputer tersebut pada layar pengguna. Misalnya dalam penggunaannya dihasilkan gambar yang menarik dan mudah untuk dipahami oleh pemakainya. Selain itu kemudahan dalam menggunakan (*user-friendly*) yang ditonjolkan juga menjadi nilai tambah untuk aplikasi tersebut. Padahal 'mesin' yang menjalankan aplikasi komputer tersebut pada dasarnya menggunakan metode numerik yang sebenarnya dapat diterapkan menggunakan elektronik *spreadsheet*, seperti *Microsoft Excel*.

Jika *Microsoft Excel* dipakai sebagai bentuk dasar dari simulator pencemar air tanah, akan terdapat banyak fungsi dalam *spreadsheet* yang secara umum pengguna telah akrab sebelumnya sehingga menjadi mudah untuk digunakan. Kemudian bila algoritma dari numerik dituangkan dalam bahasa *Visual Basic* pada *Microsoft Excel* dan disebarluaskan pada masyarakat sebagai *public domain open source*, maka simulator ini akan menjadi terjangkau bagi masyarakat luas. Berdasarkan latar belakang tersebut dibuat suatu simulator dari model matematik untuk pencemaran air tanah menggunakan *Visual Basic for Microsoft Excel*.

Apabila *Visual Basic* hanya digunakan untuk menghitung numerik dengan metode beda hingga saja, kemungkinan waktu eksekusi akan menjadi sangat lamban. Oleh karena itu sebagai alternatif, solusi model matematik dalam penulisan karya tulis ini menggunakan metode beda hingga untuk konsentrasi pencemar secara spasial tetapi untuk konsentrasi pencemar secara temporal dihitung dengan metode *Runge-Kutta* orde 4 sehingga solusi ini tetap menjadi eksplisit namun akurasinya tetap terjaga.

Simulasi pencemar air tanah dilakukan pada kondisi akuifer jenuh tidak terkekang (*unconfined saturated aquifer*) dan aliran air tanah dalam keadaan tidak tunak (*unsteady flow*) dengan pencemar yang non-reaktif (konservatif) pada media berpori. Kemudian dijalankan beberapa skenario pencemaran yang berbeda untuk melihat apakah simulasi yang dibuat sesuai dengan teori yang terkait dan *output* yang dihasilkan tidak *error* secara logika.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penulisan karya tulis ini adalah membuat aplikasi elektronik *spreadsheet* yang dapat memprediksi dinamika konsentrasi pencemar pada aliran air tanah menurut waktu secara dua dimensi spasial berdasarkan formulasi numerik, dimana untuk domain spasial digunakan metode beda hingga, sedangkan untuk domain temporal digunakan metode *Runge-Kutta* orde 4.

1.3 Ruang Lingkup Pembahasan

Ruang lingkup pembahasan dari penulisan karya tulis ini ialah:

- a. Aliran air tanah melalui media berpori (*porous media*)
- b. Diasumsikan kondisi tanah homogen dengan pencemar yang nonreaktif (*nonreactive constituents in homogeneous media*)
- c. Aliran air tanah dalam keadaan tidak tunak (*unsteady flow*)
- d. Kondisi akuifer jenuh tidak terkekang (*unconfined saturated aquifer*)
- e. Pencemaran air tanah dilihat dalam dua dimensi dengan proses fisik yang terjadi secara adveksi dan dispersi.

1.4 Metode Penulisan

Adapun metode penulisan yang dilakukan dalam karya tulis ini adalah:

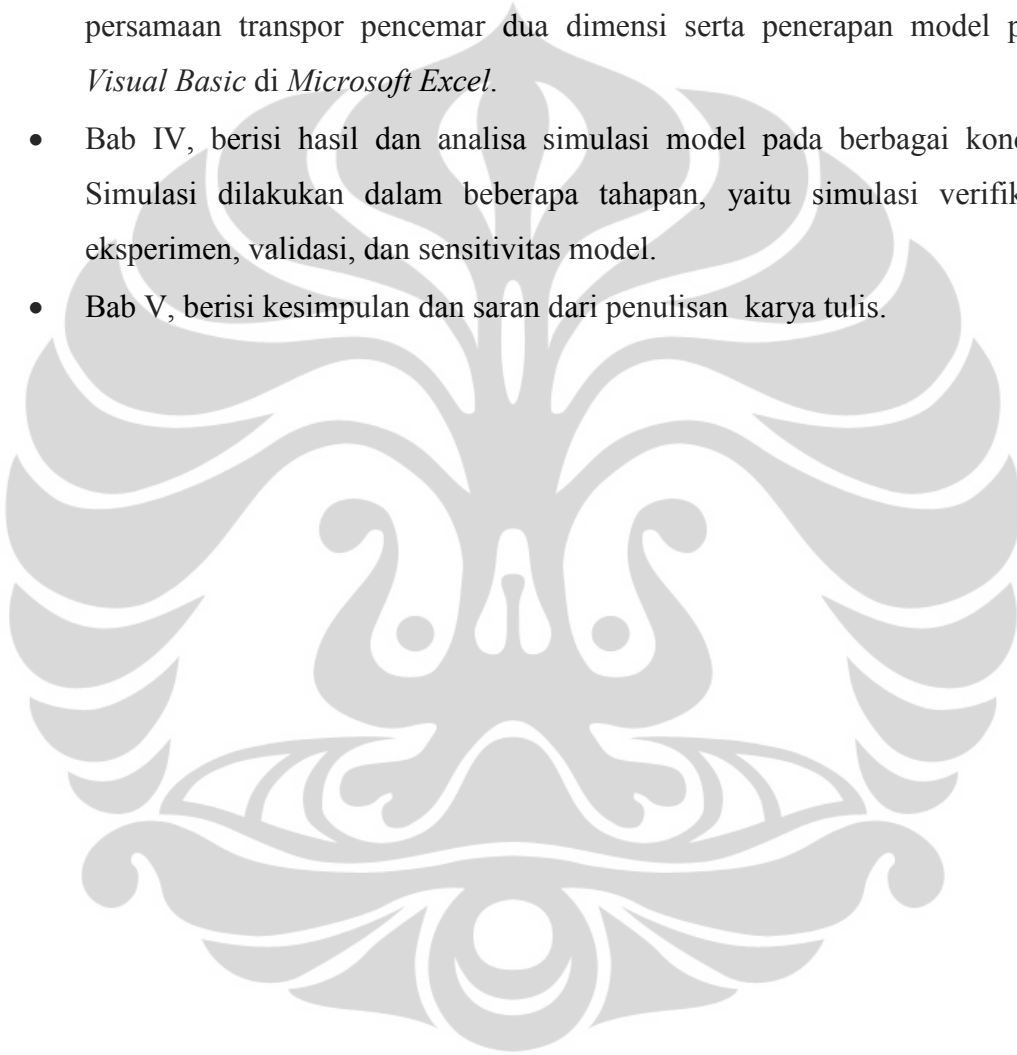
- a. Mendefinisikan transpor pencemar secara dua dimensi
- b. Menurunkan persamaan umum transpor pencemar secara dua dimensi
- c. Mengembangkan persamaan transpor pencemar menggunakan metode numerik dan menerapkan model ke dalam *Visual Basic for Microsoft Excel*
- d. Melakukan simulasi sesuai dengan skenario penjalanan program dan menganalisa hasil simulasi apakah sesuai dengan teori yang terkait dan *output* yang dihasilkan tidak *error* secara logika.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan karya tulis ini secara garis besar terbagi dalam enam bab dengan penjelasan sebagai berikut:

- Bab I, yaitu bab pendahuluan yang menjelaskan latar belakang, tujuan, metode yang digunakan, dan sistematika penulisan.

- Bab II, yaitu menerangkan teori-teori dasar dari transpor pencemar pada media berpori dan metode yang digunakan dalam penulisan karya tulis. Yaitu, penurunan persamaan umum transpor pencemar, serta metode beda hingga dan *Runge-Kutta* orde 4.
- Bab III, menjelaskan tentang pengembangan model dengan metode numerik (metode beda hingga dan *Runge-Kutta* orde 4) untuk penyelesaian persamaan transpor pencemar dua dimensi serta penerapan model pada *Visual Basic* di *Microsoft Excel*.
- Bab IV, berisi hasil dan analisa simulasi model pada berbagai kondisi. Simulasi dilakukan dalam beberapa tahapan, yaitu simulasi verifikasi, eksperimen, validasi, dan sensitivitas model.
- Bab V, berisi kesimpulan dan saran dari penulisan karya tulis.



BAB 2

PERSAMAAN UMUM TRANSPOR PENCEMAR

2.1 Teori Proses Penjalaran Pencemar (*Contaminant Transport Process*)

Titik awal dari pengembangan persamaan differensial untuk transpor suatu zat terlarut pada media berpori ialah menentukan fluks yang masuk dan keluar dari elemen volume. Konservasi massa untuk elemen volume:

$$\begin{aligned} \left[\begin{array}{c} \text{total fluks} \\ \text{massa} \\ \text{elemen volume} \end{array} \right] &= \\ \left[\begin{array}{c} \text{fluks} \\ \text{yang keluar} \\ \text{elemen volume} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{fluks} \\ \text{yang masuk} \\ \text{elemen volume} \end{array} \right] &\pm \left[\begin{array}{c} \text{penambahan} \\ \text{atau pengurangan} \\ \text{massa akibat reaksi} \end{array} \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

Proses fisik yang mengontrol fluks yang masuk dan keluar dari elemen volume adalah proses adveksi dan dispersi hidrodinamik. Sedangkan untuk penambahan atau pengurangan massa pada elemen volume dapat terjadi akibat reaksi kimia atau biokimia maupun peluruhan radioaktif. Namun karena pencemar yang dipakai diasumsikan tidak reaktif terhadap media berpori, maka proses fisik yang ditinjau dalam penulisan karya ilmiah ini hanya melihat fluks yang masuk dan keluar elemen volume, yaitu proses adveksi dan dispersi hidrodinamik.

Sebagai indikator suatu pencemaran, baik pada air permukaan maupun air tanah, dapat dinotasikan dengan massa dan konsentrasi dari pencemar itu sendiri. Massa merupakan ukuran kuantitatif sifat inersia suatu benda/zat. Sedangkan konsentrasi merupakan persentase kandungan suatu zat pada suatu larutan.

Untuk penjelasan lebih dalam mengenai indikator pencemaran akan dijelaskan terlebih dahulu dan proses fisik yang terjadi dalam penjalaran pencemar akan dibahas pada subbab selanjutnya.

2.2 Massa dan Konsentrasi

Menurut Chapra (19..) dalam pemodelan kualitas air, jumlah pencemar di dalam suatu sistem direpresentasikan dengan massa pencemar itu sendiri. Properti

seperti ini biasa dianggap sebagai properti ekstensif. Sedangkan untuk properti intensifnya berupa konsentrasi massa, yang didefinisikan sebagai:

$$C = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

Dimana m = massa pencemar (M) dan V = volume pencemar (L^3). Properti intensif ini lebih merepresentasikan ‘kekuatan/konsentrasi’ daripada sebagai ‘jumlah/kuantitas’ pencemar. Oleh karena itu, konsentrasi dipilih sebagai indikator dampak suatu pencemaran.

2.3 Kuantifikasi Beban Pencemaran pada Badan Air

Properti ini berkaitan dengan adanya perubahan waktu. Berikut ini beberapa definisi yang terkait dengan kuantifikasi beban pencemar pada badan air.

a. Massa Beban Pencemar (*Mass Loading Rate*)

Kuantifikasi massa beban pencemar ini dinotasikan dengan W . Jika massa pencemar m ditentukan selama periode tertentu t , maka kuantifikasi massa beban pencemar adalah:

$$W = \frac{m}{t} \quad (2.3)$$

Sedangkan untuk kuantifikasi massa beban pencemar yang berada dalam suatu debit aliran Q (L^3/T), ditulis dalam rumus:

$$W = Q \cdot C \quad (2.4)$$

b. Debit Aliran (*Volumetric Flow Rate*)

Untuk aliran tunak (*steady*), perhitungan menggunakan persamaan kontinuitas seperti dalam Persamaan 2.5.

$$Q = U \cdot A_c \quad (2.5)$$

Dimana U = kecepatan aliran (L/T) dan A_c = luas penampang potongan (L^2)

c. Fluks Massa Beban Pencemar (*Mass Flux Rate*)

Fluks merupakan massa yang keluar atau masuk ke sistem dimana arah fluks tegak lurus terhadap luas penampang potongan. Untuk fluks massa beban pencemar melalui pipa/saluran:

$$J = \frac{m}{t \cdot A_c} = \frac{W}{A_c} = U \cdot C \quad (2.6)$$

2.4 Proses Adveksi

Proses yang terjadi dalam aliran air tanah didasari oleh dua proses, yaitu proses adveksi dan dispersi. Aliran air tanah tersebut bergerak dengan kecepatan v dengan berbagai arah x , y , dan z . Penjalaran pencemar oleh gerak rata-rata aliran air inilah yang disebut dengan adveksi.

Proses adveksi merupakan proses dimana suatu pencemar ditransportasikan/menjalar dengan jumlah besar melalui aliran air tanah. Dari proses adveksi tersebut, pencemar yang non-reaktif akan terbawa pada kecepatan rata-rata yang sama dengan kecepatan linear rata-rata air (\bar{v}). Dimana $\bar{v} = v/n$, dengan v sebagai debit spesifik dan n adalah porositas tanah. Proses adveksi ini juga sering disebut sebagai proses konveksi, yaitu aliran dipengaruhi oleh temperatur.

Laju dari proses adveksi sama dengan \bar{v} dan konsentrasi pencemar C didefinisikan sebagai massa pencemar per volume. Sehingga untuk massa pencemar per volume pada media berpori adalah nC . Oleh karena itu fluks massa akibat proses adveksi dapat ditulis secara matematik sebagai berikut:

$$q = \bar{v}_x nC \quad (2.7)$$

Pada Persamaan 2.7, \bar{v}_x adalah kecepatan aliran rata-rata pada arah x .

2.5 Dispersi Hidrodinamik

Selain proses adveksi, terdapat kecenderungan untuk suatu pencemar menyebar secara berangsur-angsur dari jalurnya sehingga daerah aliran yang tercemar semakin meluas. Fenomena penyebaran pencemar ini disebut sebagai proses dispersi hidrodinamik (*hydrodynamic dispersion*) yang merupakan hasil makroskopik dari gerakan individual partikel pencemar dan fenomena fisika-kimia yang terjadi dalam pori pada media yang menyebabkan pengenceran konsentrasi pencemar. Secara umum, hal tersebut terjadi karena:

- a. Gaya luar yang terjadi pada fluida
- b. Geometri dalam sistem pori
- c. Difusi molekular karena gradien konsentrasi pencemar (energi termal-kinetis dari partikel)

- d. Variasi properti fluida (seperti viskositas dan massa jenis) yang mempengaruhi bentuk aliran
- e. Perubahan konsentrasi pencemar karena proses fisika-kimia pada fase liquid
- f. Interaksi antara fase cairan (liquid) dan padatan (solid)

Penyebaran pencemar pada arah aliran yang dominan disebut dengan dispersi longitudinal. Sedangkan untuk arah tegak lurus aliran disebut sebagai dispersi transversal. Secara normal dispersi arah longitudinal lebih kuat alirannya dibandingkan dispersi arah lateral.

2.6 Hukum Difusi Fick

Hukum ini menyatakan bahwa fluks massa suatu zat terlarut (dalam hal ini pencemar), pada suatu unit luas potongan penampang elemen volume per unit waktu pada arah tertentu, proporsinya sesuai dengan gradien konsentrasi pencemar pada arah tersebut. Untuk media berpori yang homogen, nilai porositas n adalah konstan, dan $\partial(nC)/\partial x = n(\partial C/\partial x)$. Sehingga untuk proses difusi satu dimensi, hukum Fick dapat ditulis secara matematika sebagai berikut:

$$q = -nD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.8)$$

Pada Persamaan 2.8, q adalah fluks massa pencemar, C adalah massa pencemar per volume, D adalah koefisien difusi atau difusivitas molekular (dengan dimensi D adalah L^2/T), dan tanda negatif mengindikasikan pencemar yang bergerak dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah.

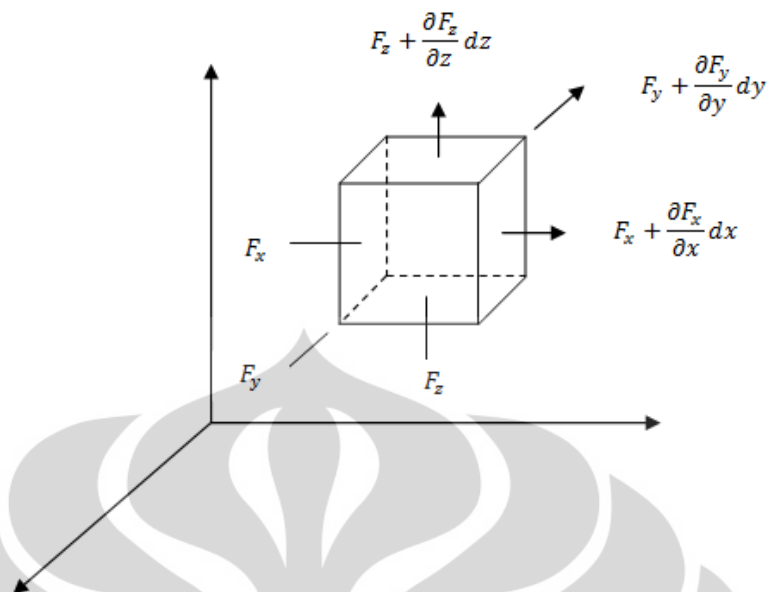
Persamaan 2.9 digunakan untuk difusi dari Hukum Fick yang ditulis sebagai vektor:

$$\mathbf{q} = -nD\nabla C \quad (2.9)$$

dimana \mathbf{q} adalah vektor fluks massa dengan komponen (q_x , q_y , q_z) pada koordinat Cartesian.

2.7 Persamaan umum Penjalaran Pencemar

Dari hukum kekekalan massa, fluks pencemar yang keluar dan masuk elemen volume pada media berpori akan terlihat seperti Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Keseimbangan Massa pada Elemen Volume

Sumber: R. A. Freeze dan J. A. Cherry, Groundwater, 1979 (telah diolah kembali)

Pada koordinat Cartesian debit spesifik (v) memiliki tiga komponen (v_x , v_y , v_z) begitu pula dengan kecepatan linear rata-rata air (\bar{v}_x , \bar{v}_y , \bar{v}_z). Massa pencemar yang bergerak pada arah x dengan menggunakan dua mekanisme transpor pencemar adalah sebagai berikut:

$$\text{transpor adveksi} = \bar{v}_x nC \, dA \quad (2.10)$$

$$\text{transpor dispersi} = nD_x \frac{\partial C}{\partial x} \, dA \quad (2.11)$$

Dimana persamaan di atas yang diturunkan dari Hukum Fick yang telah dijelaskan sebelumnya dan dA adalah luas potongan penampang dari elemen volume. Koefisien dispersi D_x berkaitan dengan dispersivitas (α_x) dan koefisien difusi (D^*):

$$D_x = \alpha_x \bar{v}_x + D^* \quad (2.12)$$

Jika F_x mewakili total massa pencemar per luas penampang potongan dalam arah x per satuan waktu, maka

$$F_x = \bar{v}_x nC - nD_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.13)$$

Tanda negatif sebelum suku dispersi menyatakan pencemar bergerak ke daerah yang memiliki konsentrasi lebih rendah. Sehingga persamaan untuk dua dimensi lainnya menjadi:

$$F_y = \bar{v}_y n C - n D_y \frac{\partial C}{\partial y} \quad (2.14)$$

$$F_z = \bar{v}_z n C - n D_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2.15)$$

sehingga total pencemar yang masuk pada elemen volume adalah:

$$F_x dy dz + F_y dz dx + F_z dx dy \quad (2.16)$$

dan total pencemar yang meninggalkan elemen volume ialah:

$$\left(F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx\right) dy dz + \left(F_y + \frac{\partial F_y}{\partial y} dy\right) dz dx + \left(F_z + \frac{\partial F_z}{\partial z} dz\right) dx dy \quad (2.17)$$

Bagian suku parsial mengindikasikan perubahan pencemar secara spasial untuk arah tertentu, maka selisih fluks yang masuk dan keluar elemen volume menjadi:

$$\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}\right) dx dy dz \quad (2.18)$$

Oleh karena pencemar diasumsikan merupakan zat yang non-reaktif, selisih fluks yang masuk dan keluar elemen sama dengan jumlah pencemar terakumulasi pada elemen volume sehingga perubahan massa pada elemen menjadi:

$$-n \frac{\partial C}{\partial t} dx dy dz \quad (2.19)$$

Maka persamaan lengkap dari kekekalan massa diekspresikan sebagai berikut:

$$\left(\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}\right) = -n \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.20)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.13), (2.14), (2.15) ke dalam persamaan (2.20) dan menghilangkan n pada kedua bagian menjadi:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right)\right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{v}_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{v}_z C)\right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.21)$$

Pada media berpori yang homogen, kecepatan \bar{v} adalah tunak dan seragam (*steady and uniform*) atau tidak bervariasi terhadap ruang dan waktu sedangkan D_x , D_y , D_z tidak bervariasi terhadap ruang. Sehingga persamaan menjadi:

$$\left[\left(D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right) + \left(D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right) + \left(D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}\right)\right] - \left[\left(\bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \left(\bar{v}_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \left(\bar{v}_z \frac{\partial C}{\partial z}\right)\right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.22)$$

Persamaan untuk satu dimensi:

$$\left[D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right] - \left[\bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x}\right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.23)$$

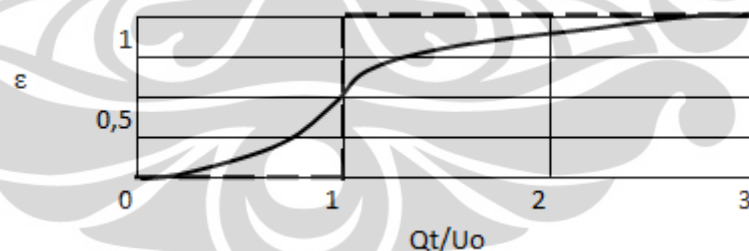
Di beberapa aplikasi, penyebaran pencemar pada satu dimensi berupa suatu kurva linear yang mengikuti arah aliran. Untuk penyebaran secara dua dimensi dimungkinkan untuk mendefinisikan arah menjadi x dan z . Dimana x adalah arah sejajar aliran dan z ialah arah tegak lurus aliran, sehingga persamaan untuk dua dimensi:

$$D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \bar{v}_x \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (2.24)$$

dengan D_x dan D_z adalah koefisien dispersi pada arah longitudinal dan tegak lurusnya.

2.8 Pencemar non-reaktif pada media berpori homogen

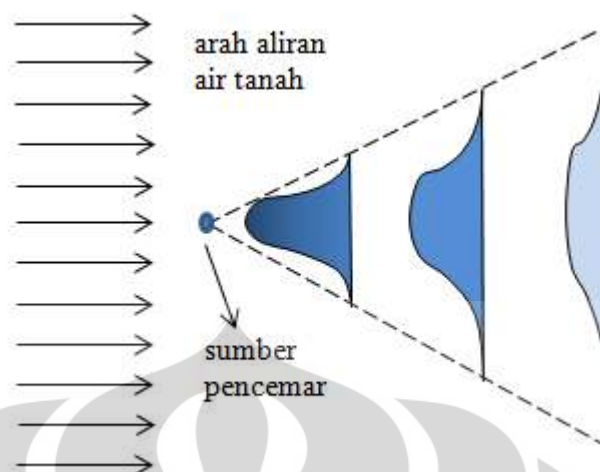
Percobaan klasik mengenai pencemar non-reaktif pada media berpori yang homogen yang jenuh dengan air mengilustrasikan secara fisik bentuk persamaan adveksi-dispersi dalam satu dimensi. Pencemar non-reaktif dimasukkan secara berkelanjutan dengan konsentrasi awal C_0 pada suatu tabung yang berisi media berpori yang homogen. Diasumsikan pada awal percobaan tidak ada pencemar pada tabung. Kemudian dengan mengekspresikan konsentrasi pada tabung, C , merupakan konsentrasi relatif terhadap konsentrasi pencemar awal C_0 . Hubungan antara distribusi konsentrasi pencemar relatif dengan waktu ataupun volume pencemar disebut dengan *breakthrough curve* seperti pada Gambar 2.2 .



Gambar 2.2. *Breakthrough Curve*

Sumber: R. A. Freeze dan J. A. Cherry, *Groundwater*, 1979 (telah diolah kembali)

Pada Gambar 2.2 ketika dispersi tidak ada, *breakthrough curve* digambarkan dengan garis putus-putus. Sedangkan garis yang solid yang berbentuk seperti *s-curve*, menggambarkan *breakthrough curve* untuk keadaan dimana terdapat dispersi hidrodinamik.



Gambar 2.3. Variasi Konsentrasi Pencemar Akibat Penjalaran

Sumber: R. A. Freeze dan J. A. Cherry, *Groundwater*, 1979 (telah diolah kembali)

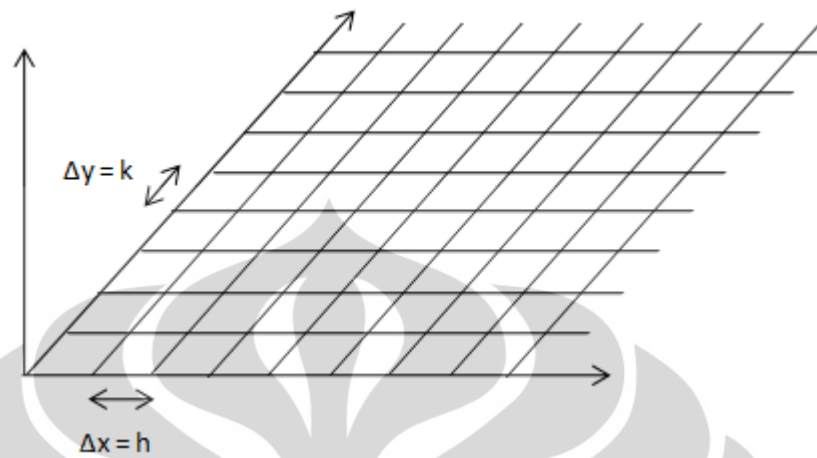
Baik penjalaran adveksi maupun dispersi pada suatu sistem media berpori akan mempengaruhi penjalaran pencemar. Seperti pada Gambar 2.3, variasi pada kecepatan aliran (secara lokal) baik besar dan arahnya sepanjang aliran yang berliku-liku (*tortuous flow path*), akan menyebabkan massa pencemar awal menyebar ke samping (tegak lurus aliran air tanah).

Penjalaran dispersi (baik dispersi mekanik maupun difusi molekuler) dipengaruhi oleh adanya aliran dan keberadaan pori-pori pada media. Selain itu, keheterogenan media berpori (dikarenakan oleh permeabilitas media berpori yang dilewati oleh aliran air tanah) juga berpengaruh pada penjalaran dispersi mekanik.

2.9 Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*)

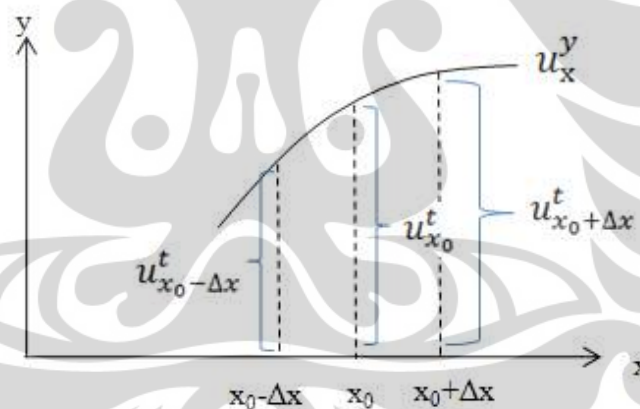
Persamaan transpor pencemar didapat dari sebuah elemen volume media berpori yang diturunkan dari hukum kekekalan massa merupakan Persamaan Diferensial Parsial (PDP). Yaitu persamaan fungsi dimana terdapat satu atau lebih variabel tidak diketahui. Seperti pada penjelasan rumus persamaan transpor pencemar, persamaan ini memiliki domain spasial dan temporal. Untuk mendapatkan solusi persamaan digunakan metode numerik, yang dalam hal ini menggunakan metode beda hingga (*Finite Difference Method*) secara eksplisit untuk domain spasial.

Dalam aplikasinya, metode beda hingga menggunakan grid seperti Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Penggunaan Grid pada *Finite Difference*

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 2.5. Grafik Fungsi u

Sumber: Olahan Penulis

Dari Gambar 2.5 di atas akan diperoleh persamaan untuk turunan pertama yang ditulis dalam bentuk:

a. Forward difference

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{x_0 + \Delta x}^t - u_{x_0}^t}{\Delta x} \quad (2.26)$$

b. Backward difference

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{x_0}^t - u_{x_0-\Delta x}^t}{\Delta x} \quad (2.27)$$

c. Central difference

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{x_0+\Delta x}^t - u_{x_0-\Delta x}^t}{2\Delta x} \quad (2.28)$$

Sedangkan untuk turunan kedua, bentuk persamaan *central difference* menjadi:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{x_0+\Delta x}^t - 2u_{x_0}^t + u_{x_0-\Delta x}^t}{\Delta x^2} \quad (2.29)$$

2.10 Metode *Runge-Kutta* Orde 4

Metode *Runge-Kutta* dapat mencapai akurasi dari pendekatan deret *Taylor* tanpa membutuhkan perhitungan dari penurunan yang lebih rumit. Bentuk umum persamaannya adalah:

$$y_{i+1} = y_i + \Phi(x_i, y_i, h)h \quad (2.30)$$

dimana $\Phi(x_i, y_i, h)$ merupakan *increment function*, yang diinterpretasikan sebagai kemiringan dari suatu interval.

Metode RK orde 4 merupakan metode *Runge-Kutta* yang paling populer. Berikut ini merupakan bentuk umum persamaan *Runge-Kutta* orde 4:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (2.31)$$

dengan

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (2.32)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_1h\right) \quad (2.33)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}k_2h\right) \quad (2.34)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3h) \quad (2.35)$$

$$f(x_i, y_i) = \frac{dy}{dx} \quad (2.36)$$

BAB 3

PENGEMBANGAN MODEL TRANSPOR PENCEMAR AIR TANAH

3.1 Pengembangan Metode Numerik pada Model Transpor Pencemar Air Tanah Dua Dimensi

Persamaan transpor pencemar yang telah diturunkan mengandung beberapa komponen. Komponen utama yaitu konsentrasi sebagai fungsi dari variabel ruang dan waktu. Komponen lainnya adalah parameter kecepatan aliran, koefisien dispersi (dispersivitas dan koefisien difusi), serta porositas yang diasumsikan bernilai tetap untuk media berpori yang ditinjau. Nilai dari komponen-komponen ini akan menjadi *input* untuk persamaan transpor pencemar.

Untuk komponen yang berubah terhadap domain spasial dan temporal, akan diselesaikan dengan menggunakan metode numerik. Yaitu metode beda hingga (*Finite Difference Method*) untuk domain spasial dan metode Runge-Kutta orde 4 untuk domain temporal.

3.1.1 Persamaan Transpor Pencemar dengan Metode Beda Hingga

Metode beda hingga (*Finite Difference Method*) yang akan digunakan adalah *forward difference* karena kemudahan dalam penggunaan dan akan membuat persamaan menjadi eksplisit (mencari nilai yang tidak diketahui dari nilai-nilai yang diketahui). Dengan membuat kondisi batas dan kondisi awal, akan dihasilkan nilai konsentrasi pencemar di titik yang akan dihitung selanjutnya. Pada akhirnya didapat grafik berupa kontur konsentrasi pencemar pada aliran air tanah berdasarkan domain spasial x dan z .

Dari uraian pada bab sebelumnya persamaan transpor pencemar dua dimensi (arah x dan z) *finite difference* untuk domain spatial adalah

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} - \bar{v}_z \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3.1)$$

Dengan menggunakan hukum *Taylor*, yang menjadi rumus untuk *forward difference*, maka persamaan differensial dapat diubah bentuk menjadi persamaan aljabar biasa.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{x+\Delta x} - y_x}{\Delta x} \quad (3.2)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{x+\Delta x} - 2y_x + y_{x-\Delta x}}{\Delta x^2} \quad (3.3)$$

Untuk memudahkan pemahaman, penulisan pada setiap persamaan digunakan *subscript* huruf x dan z untuk menandakan perubahan jarak (spasial). Indeks *superscript* t menandakan waktu saat konsentrasi ditinjau, sehingga persamaan (3.1) di atas menjadi persamaan di bawah ini.

$$D_x \left(\frac{C_{x+1,z}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x-1,z}^t}{\Delta x^2} \right) + D_z \left(\frac{C_{x,z+1}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x,z-1}^t}{\Delta z^2} \right) - \bar{v}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{v}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.4)$$

Untuk $D_x = \alpha_x \bar{v}_x + D^*$ dan $D_z = \alpha_z \bar{v}_z + D^*$ maka

$$(\alpha_x \bar{v}_x + D^*) \left(\frac{C_{x+1,z}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x-1,z}^t}{\Delta x^2} \right) + (\alpha_z \bar{v}_z + D^*) \left(\frac{C_{x,z+1}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x,z-1}^t}{\Delta z^2} \right) - \bar{v}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{v}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.5)$$

Sedangkan apabila $\alpha_x = \alpha_z = \alpha$ persamaan (3.5) menjadi lebih sederhana seperti persamaan berikut:

$$(\alpha \bar{v}_x + D^*) \left(\frac{C_{x+1,z}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x-1,z}^t}{\Delta x^2} \right) + (\alpha \bar{v}_z + D^*) \left(\frac{C_{x,z+1}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x,z-1}^t}{\Delta z^2} \right) - \bar{v}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{v}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.6)$$

3.1.2 Persamaan Transpor Pencemar dengan Metode *Runge-Kutta* Orde 4

Kemudian untuk langkah selanjutnya, yaitu menggunakan metode *Runge-Kutta* orde 4 dalam memprediksi nilai konsentrasi pencemar terhadap perubahan waktu tertentu. Dengan menggunakan metode *Runge-Kutta* orde 4 ini akan diperoleh nilai konsentrasi pencemar yang cukup konvergen terhadap nilai aktual (analitik).

Variabel y pada bentuk umum *Runge-Kutta* orde 4 pada persamaan (2.31), (2.32), (2.33), (2.34), (2.35), dan (2.36) di atas dapat diganti menjadi nilai konsentrasi C pada persamaan transpor pencemar. Sehingga dengan metode *Runge-Kutta* orde 4 untuk persamaan transpor pencemar (3.6) menjadi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = (\alpha \bar{v}_x + D^*) \frac{C_{x+1,z}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x-1,z}^t}{\Delta x^2} + (\alpha \bar{v}_z + D^*) \frac{C_{x,z+1}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x,z-1}^t}{\Delta z^2} - \bar{v}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{v}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.7)$$

$$\frac{C_{x,z}^{t+\Delta t} - C_{x,z}^t}{\Delta t} = (\alpha \bar{v}_x + D^*) \frac{C_{x+1,z}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x-1,z}^t}{\Delta x^2} + (\alpha \bar{v}_z + D^*) \frac{C_{x,z+1}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x,z-1}^t}{\Delta z^2} - \bar{v}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{v}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.8)$$

Persamaan transpor pencemar disesuaikan dengan bentuk umum *Runge-Kutta* orde 4 (2.31), menjadi:

$$C_{x,z}^{t+\Delta t} = C_{x,z}^t + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\Delta t \quad (3.9)$$

dimana

$$k_1 = (\alpha\bar{u}_x + D^*) \frac{C_{x+1,z}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x-1,z}^t}{\Delta x^2} + (\alpha\bar{u}_z + D^*) \frac{C_{x,z+1}^t - 2C_{x,z}^t + C_{x,z-1}^t}{\Delta z^2} - \bar{u}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{u}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.10)$$

$k_2 =$

$$(\alpha\bar{u}_x + D^*) \frac{(C_{x+1,z}^t) - 2(C_{x,z}^t + \frac{1}{2}k_1\Delta t) + (C_{x-1,z}^t)}{\Delta x^2} + (\alpha\bar{u}_z + D^*) \frac{(C_{x,z+1}^t) - 2(C_{x,z}^t + \frac{1}{2}k_1\Delta t) + (C_{x,z-1}^t)}{\Delta z^2} - \bar{u}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{u}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.11)$$

$k_3 =$

$$(\alpha\bar{u}_x + D^*) \frac{(C_{x+1,z}^t) - 2(C_{x,z}^t + \frac{1}{2}k_2\Delta t) + (C_{x-1,z}^t)}{\Delta x^2} + (\alpha\bar{u}_z + D^*) \frac{(C_{x,z+1}^t) - 2(C_{x,z}^t + \frac{1}{2}k_2\Delta t) + (C_{x,z-1}^t)}{\Delta z^2} - \bar{u}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{u}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.12)$$

$k_4 =$

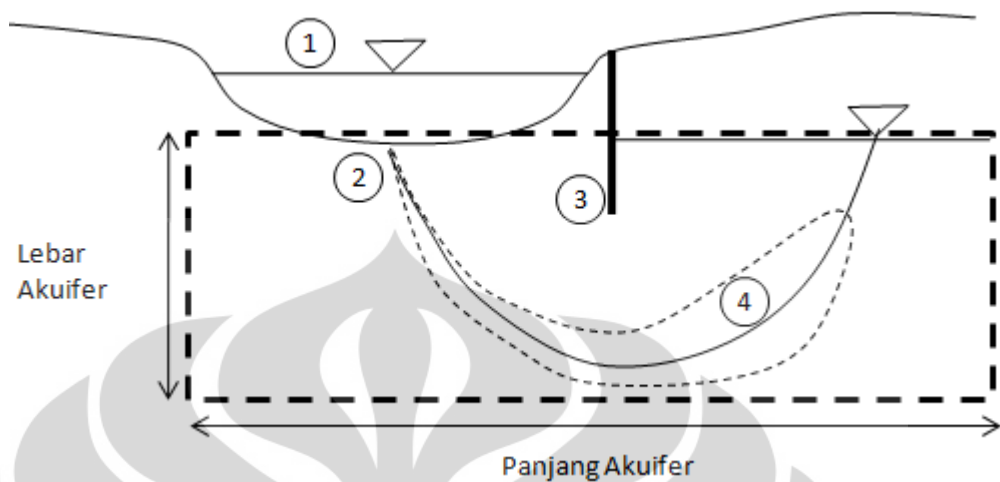
$$(\alpha\bar{u}_x + D^*) \frac{(C_{x+1,z}^t) - 2(C_{x,z}^t + k_3\Delta t) + (C_{x-1,z}^t)}{\Delta x^2} + (\alpha\bar{u}_z + D^*) \frac{(C_{x,z+1}^t) - 2(C_{x,z}^t + k_3\Delta t) + (C_{x,z-1}^t)}{\Delta z^2} - \bar{u}_x \frac{C_{x+1}^t - C_x^t}{\Delta x} - \bar{u}_z \frac{C_{z+1}^t - C_z^t}{\Delta z} \quad (3.13)$$

3.2 Parameter, Kondisi Batas, dan Kondisi Awal Model Transpor Pencemar

Pembuatan Model Transpor Pencemar bertujuan agar dapat memprediksi dinamika konsentrasi pencemar pada aliran air tanah secara dua dimensi. Adapun kondisi lapangan yang dimodelkan dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Pada Gambar 3.1 diilustrasikan bahwa pada kondisi lapangan yang berupa danau terdapat *sheet pile* yang membatasi (nomor 3) dan terletak di antara air permukaan (nomor 1) dan air tanah (bidang kontak air permukaan dan air tanah). Kemudian danau tersebut tercemar polutan yang dapat masuk mencemari air tanah di sekitarnya (nomor 2). Pada kondisi seperti ini diasumsikan aliran air di dalam tanah seperti garis solid dan dinding batas kanan, kiri, dan bawah adalah lapisan *impermeable*. Oleh karena itu dibuat akuifer yang ditinjau yang dibatasi oleh persegi dengan garis putus-putus disebut dengan kondisi *seepage tank* sehingga kondisi tersebut dapat disimulasikan ke dalam Model Transpor

Pencemar dengan perkiraan penjalaran pencemar terjadi seperti nomor 4 pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Ilustrasi kondisi lapangan yang dimodelkan

Sumber: Olahan Penulis

Seperti pada Gambar 3.1, untuk menyelesaikan persamaan differensial parsial transpor pencemar air tanah menggunakan metode numerik beda hingga dan *Runge-Kutta* orde 4 memerlukan beberapa hal, antara lain:

3.2.1 Parameter dan Variabel

Adapun parameter dan variabel yang menjadi masukan data untuk Model Transpor Pencemar (baik untuk Metode *Runge-Kutta* Orde 4 maupun Metode Analitik) adalah:

- Panjang akuifer (P_{jg}), yaitu besar panjang akuifer yang akan disimulasikan (searah sumbu X).
- Lebar akuifer (L_{br}), yaitu besar lebar akuifer yang akan disimulasikan (searah sumbu Z). Besar lebar akuifer dapat bernilai sama (akuifer berbentuk persegi) maupun beda (akuifer berbentuk persegi).
- Jarak antara titik sumbu X (dx), yaitu jarak antara titik tinjauan (grid) pada sumbu X yang akan disimulasikan agar akuifer dapat sesuai dengan prinsip metode beda hingga.

- d. Jarak antara titik sumbu Z (dz), yaitu jarak antara titik tinjauan (grid) pada sumbu Z yang akan disimulasikan agar akuifer dapat sesuai dengan prinsip metode beda hingga.
- e. Waktu penelusuran (t), yaitu durasi perjalanan simulasi model transpor pencemar.
- f. Jarak antar waktu (dt), yaitu selisih waktu penelusuran saat simulasi.
- g. Kecepatan uniform arah X (V_x), yaitu kecepatan air tanah pada akuifer yang akan disimulasi searah sumbu X.
- h. Kecepatan uniform arah Z (V_z), yaitu kecepatan air tanah pada akuifer yang akan disimulasi searah sumbu Z. Apabila dilakukan simulasi untuk satu dimensi, parameter ini diisi dengan angka 0.
- i. Dispersivitas (a), yaitu nilai dispersivitas pencemar. Dalam hal ini dispersivitas dianggap sama (homogen) baik untuk sumbu X maupun sumbu Z.
- j. Koefisien Difusi (D^*), yaitu koefisien difusi pencemar yang akan disimulasikan.

3.2.2 Kondisi Batas

Kondisi batas merupakan nilai konsentrasi di titik-titik yang menjadi batas atau acuan. Adapun kondisi batas yang digunakan dalam model ini ialah:

- a. Konsentrasi Batas Dinding (*impermeable*)
Kondisi ini terjadi apabila akuifer yang dimodelkan berbatasan dengan akuitar (lapisan air tanah yang sangat sedikit mengalirkan air tanah) atau lapisan *impermeable* (kedap air). Kondisi ini memenuhi persamaan $\frac{dC}{dx} = 0$ atau tidak ada perbedaan konsentrasi (dC) pada kedua titik yang berjarak dx .
- b. Konsentrasi Titik *Loading* (*Dye*)
Merupakan konsentrasi pencemar yang masuk ke dalam akuifer dan mencemari air tanah. Konsentrasi ini memiliki satuan mg/L. Titik ini dapat dikenali oleh model sebagai *continous loading* dengan warna sel merah (*default* pada tombol Tandai). Namun apabila *loading* pada simulasi yang dilakukan berupa *spill loading*, maka cukup dengan menuliskan angka

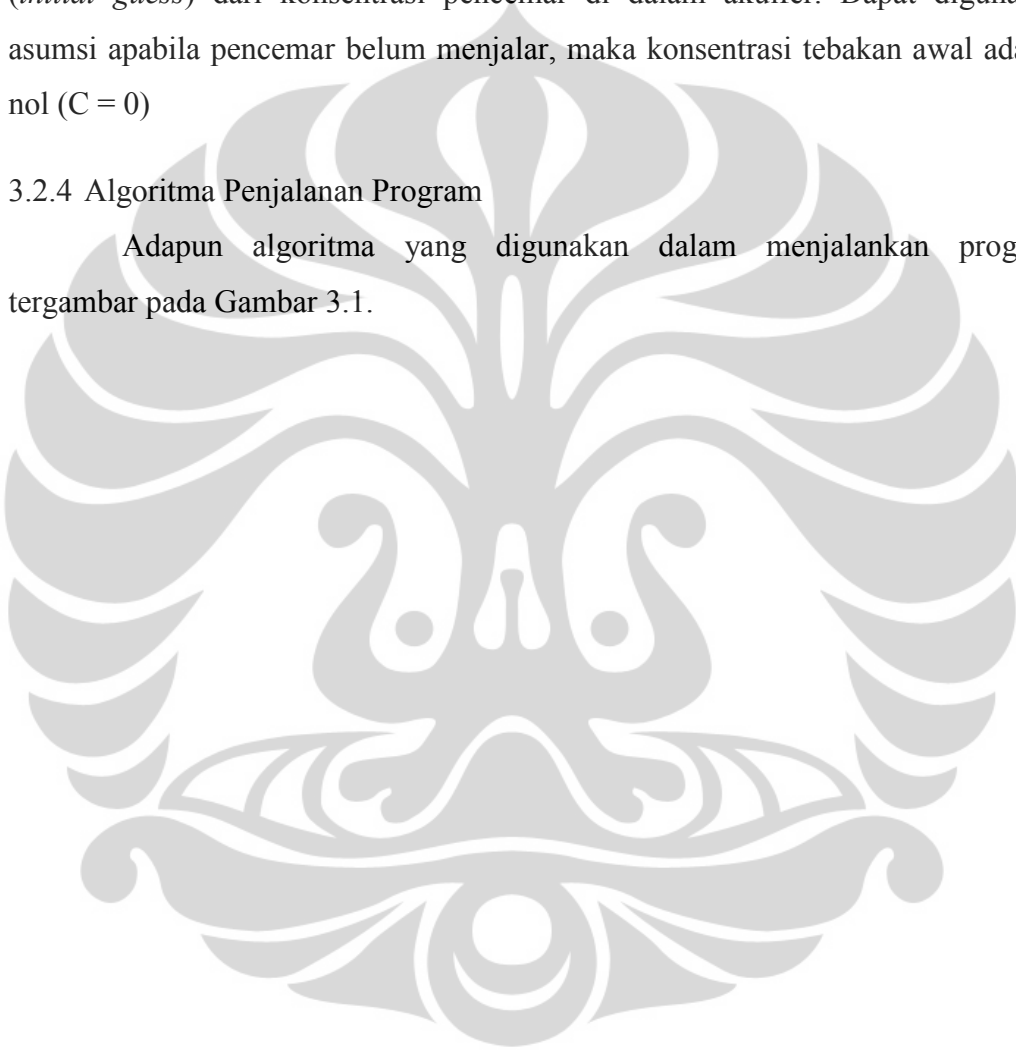
konsentrasi *loading* pada sel berwarna biru yang menjadi titik masuk *loading*.

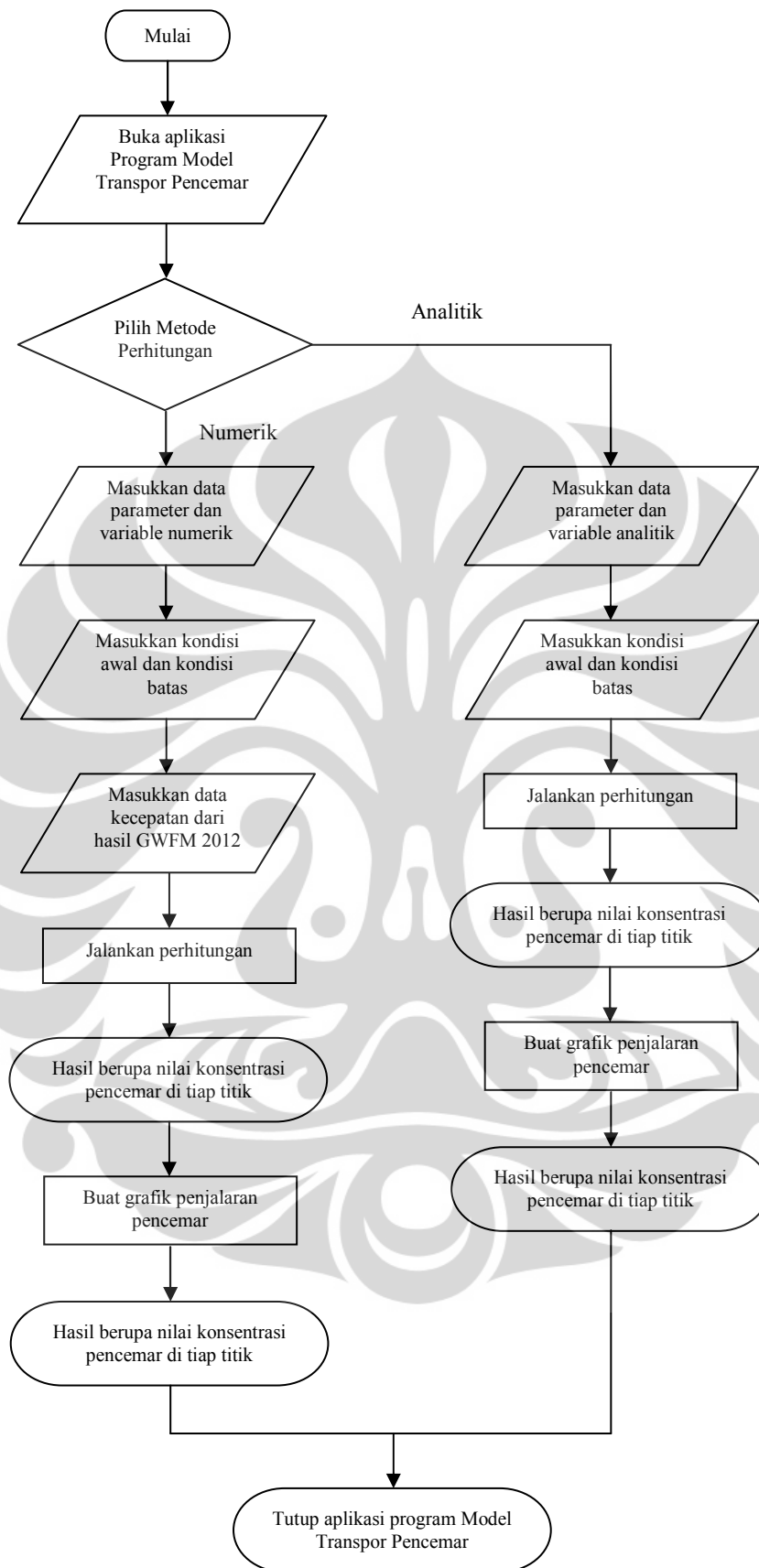
3.2.3 Kondisi Awal (*Initial Condition*)

Merupakan nilai konsentrasi pencemar pada semua titik tinjauan (kecuali batas dinding dan titik *loading*). Kondisi awal ini dapat berupa tebakan awal (*initial guess*) dari konsentrasi pencemar di dalam akuifer. Dapat digunakan asumsi apabila pencemar belum menjalar, maka konsentrasi tebakan awal adalah nol ($C = 0$)

3.2.4 Algoritma Penjalanan Program

Adapun algoritma yang digunakan dalam menjalankan program tergambar pada Gambar 3.1.





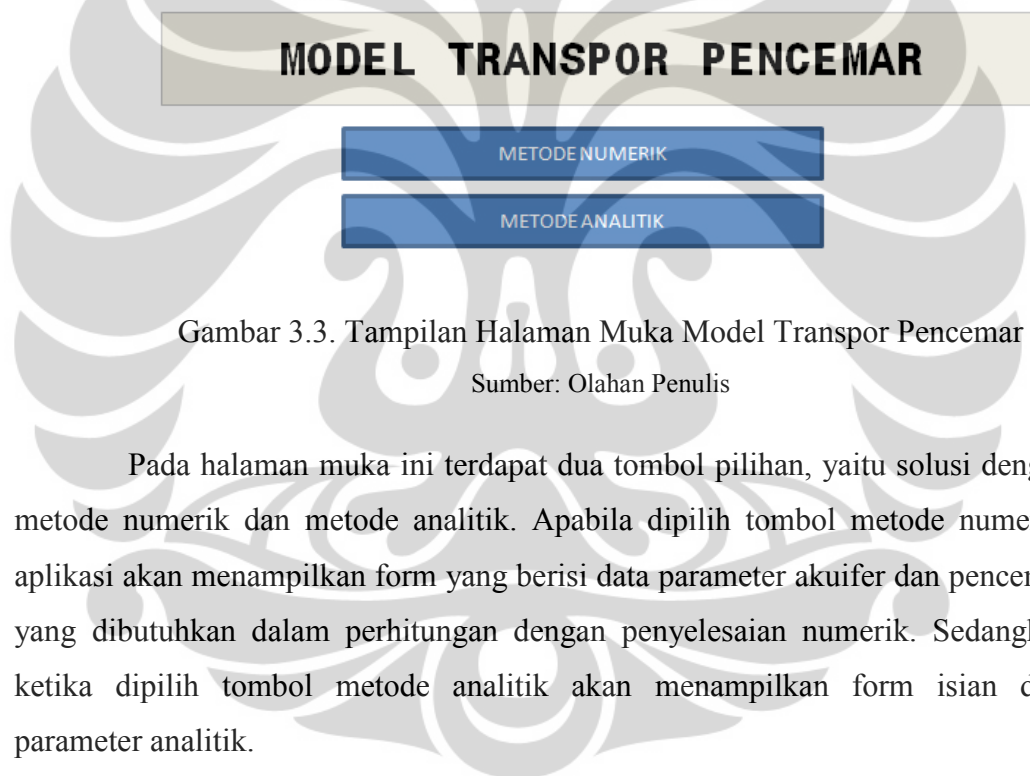
Gambar 3.2. Algoritma Penjalanan Program

Sumber: Olahan Penulis

3.3 Aplikasi Program Model Transpor Pencemar

Setelah menurunkan persamaan transpor pencemar dan memodelkan secara numerik menggunakan metode beda hingga dan Runge-Kutta orde 4, model matematika akan diterapkan ke dalam bahasa pemrograman *Visual Basic for microsoft Excel*. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, latar belakang dipilihnya bahasa program *Visual Basic* pada *Microsoft Excel* adalah karena dapat dipelajari dan dijalankan dengan mudah oleh pemakainya walaupun tetap memiliki kekurangan dalam hal waktu eksekusi program. Bahasa *Visual Basic* ini digunakan untuk solusi metode numerik maupun metode analitik.

Gambar 3.3 menampilkan halaman muka aplikasi Model Transpor Pencemar.



Gambar 3.3. Tampilan Halaman Muka Model Transpor Pencemar

Sumber: Olahan Penulis

Pada halaman muka ini terdapat dua tombol pilihan, yaitu solusi dengan metode numerik dan metode analitik. Apabila dipilih tombol metode numerik, aplikasi akan menampilkan form yang berisi data parameter akuifer dan pencemar yang dibutuhkan dalam perhitungan dengan penyelesaian numerik. Sedangkan ketika dipilih tombol metode analitik akan menampilkan form isian data parameter analitik.

3.3.1 Aplikasi Model Penyelesaian Metode Numerik (Metode Beda Hingga dan *Runge-Kutta* Orde 4)

Apabila dipilih tombol metode numerik dari halaman muka aplikasi Model Transpor Pencemar, maka akan tampil form data parameter dan variabel untuk metode numerik pada Gambar 3.4.

Gambar 3.4. Form Data parameter dan Variabel untuk Penyelesaian Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

Parameter yang dimasukkan pada aplikasi dengan solusi metode numerik adalah panjang akuifer (m), lebar akuifer (m), jarak antar titik sumbu X (m), jarak antar titik sumbu Z (m), waktu penelusuran (detik), jarak antar waktu (detik), dispersivitas (m) dan koefisien difusi ($m^2/detik$). Kemudian pada form ini terdapat dua tombol pilihan, yaitu *Hapus Semua* dan *OK*. Tombol *Hapus Semua* dipilih untuk menghapus semua data parameter yang telah dimasukkan. Sedangkan tombol *OK* dipilih untuk membuat bidang akuifer apabila data parameter telah sesuai dengan yang diinginkan. Setelah tombol *OK* dipilih, maka aplikasi akan menuju halaman model dengan penyelesaian numerik (metode beda hingga dan Runge-Kutta orde 4).

Setelah sampai pada halaman model dengan penyelesaian numerik, akan muncul tampilan halaman seperti pada Gambar 3.5



Gambar 3.5. Tampilan Halaman Model untuk Penyelesaian Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

Pada halaman ini terdapat beberapa tombol pilihan, antara lain:

a. Ubah Masukan Data

Berfungsi ketika pengguna aplikasi ingin mengubah data parameter yang telah dimasukkan sebelumnya. Apabila tombol ini ditekan, akan muncul form yang sama dengan form isian data parameter lengkap dengan angka yang telah dimasukkan sebelumnya sehingga pengguna hanya mengubah data yang ingin diubah (tidak memasukkan ulang semua data).

The screenshot shows a dialog box titled "Model Transpor Pencemar" with a close button (X) in the top right corner. It contains two columns of input fields, each with a unit label to its right. At the bottom, there are two buttons: "Hapus Semua" and "OK".

Parameter	Value	Unit
Panjang Akuifer	144	m
Waktu Penelusuran	100000	dtk
Lebar Akuifer	32	m
Jarak antar waktu (dt)	1000	dtk
Jarak antar titik Sb. X (dx)	8	m
Dispersivitas	5	m
Jarak antar titik Sb. Z (dz)	8	m
Koefisien Difusi	0	m ² /dt

Gambar 3.6. Contoh Tampilan Form *Ubah Masukan Data* untuk Penyelesaian Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

b. Kondisi Awal dan Kondisi Batas

Berfungsi untuk menentukan kondisi dari tiap-tiap sel pada akuifer yang telah dibuat. Berikut ini merupakan tampilan form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas*:

Kategori	Range Selector	Unit	Aksi
Konsentrasi Awal (Porous Media)	<input type="text" value=" -"/>	mg/L	Tandai
Dinding (Impermeable)	<input type="text" value=" -"/>	mg/L	Tandai
Konsentrasi Titik (Dye)	<input type="text" value=" -"/>	mg/L	Tandai

Gambar 3.7. Tampilan Form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* untuk Penyelesaian Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

Pada kondisi awal, pengguna dapat memilih *range* sel pada akuifer. Kemudian mengisi nilai konsentrasi pada pilihan konsentrasi awal. Untuk menandai sel yang telah diberi kondisi awal, maka pengguna harus memilih tombol *Tandai*. Sehingga sel yang telah dipilih pada akuifer akan berubah warna menjadi warna biru.

Kemudian pada kondisi batas, pengguna dapat memasukkan nilai konsentrasi pada dinding yang *impermeable* dengan memilih range sel dan menekan tombol *Tandai*. Apabila tombol *Tandai* untuk kondisi batas telah ditekan, maka sel yang dipilih akan berubah warna menjadi abu-abu.

Sama halnya dengan kondisi awal dan kondisi batas, untuk memasukkan nilai konsentrasi *loading (dye)* yang berupa *continous loading* pengguna dapat memilih titik tertentu pada akuifer untuk dijadikan titik masuknya pencemar. setelah pengguna memilih titik dan mengisi nilai konsentrasi, pilih tombol *Tandai* agar sel yang telah dipilih pada akuifer berubah menjadi warna merah. Namun apabila pengguna ingin memasukkan pencemar yang berupa *spill loading*. Maka pengguna dapat langsung menuliskan di sel tertentu pada akuifer.

d. Jalankan

Dengan menekan tombol ini, maka program akan melakukan perhitungan dengan penyelesaian metode numerik (metode beda hingga dan *Runge-Kutta* orde 4).

e. Grafik

Dengan menekan tombol ini, akan ditampilkan grafik konsentrasi pencemar yang berupa kontur konsentrasi.

f. Reset Waktu

Dengan menekan tombol ini, waktu yang tertera akan berubah menjadi nol (0) kembali.

g. Input Kecepatan X

Berfungsi untuk memasukkan nilai kecepatan pada masing-masing sel searah sumbu X. Untuk simulasi satu dimensi, nilai kecepatan yang dimasukkan dapat ditulias manual oleh pengguna dengan nilai kecepatan uniform di tiap sel. Namun untuk simulasi dua dimensi, diperlukan nilai kecepatan yang non-uniform yang didapatkan dari hasil aplikasi program GWFM 2012 dengan catatan parameter yang dimasukkan pada masing-masing aplikasi program telah disesuaikan.

h. Input Kecepatan Z

Berfungsi untuk memasukkan nilai kecepatan pada masing-masing sel searah sumbu Z. Untuk simulasi satu dimensi, nilai kecepatan yang dimasukkan dapat ditulias manual oleh pengguna dengan nilai kecepatan uniform di tiap sel. Namun untuk simulasi dua dimensi, diperlukan nilai kecepatan yang non-uniform yang didapatkan dari hasil aplikasi program GWFM 2012 dengan catatan parameter yang dimasukkan pada masing-masing aplikasi program telah disesuaikan.

3.3.2 Aplikasi Model Penyelesaian Metode Analitik

Sama halnya seperti penyelesaian metode numerik, apabila dipilih tombol metode analitik, aplikasi akan memunculkan form yang berisi data parameter akuifer dan pencemar yang dibutuhkan dalam perhitungan dengan

penyelesaian analitik. Gambar 3.8 adalah tampilan form data parameter dan variabel untuk metode analitik.

Gambar 3.8. Contoh Tampilan Form Data Parameter dan Variabel untuk Penyelesaian Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

Sama seperti form untuk metode numerik, form untuk metode analitik juga memiliki beberapa parameter yang dimasukkan pada aplikasi yaitu panjang akuifer (m), lebar akuifer (m), jarak antar titik sumbu X (m), jarak antar titik sumbu Z (m), waktu penelusuran (detik), kecepatan uniform (m/detik) dan koefisien dispersi ($m^2/detik$). Kemudian pada form ini terdapat dua tombol pilihan, yaitu *Hapus Semua* dan *OK*. Tombol *Hapus Semua* dipilih untuk menghapus semua data parameter yang telah dimasukkan. Sedangkan tombol *OK* dipilih untuk membuat bidang akuifer apabila data parameter telah sesuai dengan yang diinginkan. Setelah tombol *OK* dipilih, maka aplikasi akan menuju ke halaman model dengan penyelesaian analitik. Kemudian setelah masuk pada halaman model dengan penyelesaian analitik, akan tampil *layout* seperti Gambar 3.8.



Gambar 3.9. Tampilan Halaman Model Tanspor Pencemar untuk Penyelesaian Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

Dari Gambar 3.9 terlihat bahwa terdapat beberapa tombol pilihan, antara lain:

a. Ubah Masukan Data

Berfungsi ketika pengguna aplikasi ingin mengubah data parameter yang telah dimasukkan sebelumnya pada form data parameter metode analitik. Apabila tombol ini dipilih, akan muncul form yang sama dengan form isian data parameter lengkap dengan angka yang telah dimasukkan sebelumnya sehingga pengguna hanya mengubah data yang ingin diubah (tidak memasukkan ulang semua data).

Parameter	Nilai	Unit
Panjang Akuifer	20	m
Waktu Penelusuran	1000	dtk
Lebar Akuifer	1	m
Kecepatan uniform (V)	0,001	m/dtk
Jarak antar titik Sb. X (dx)	1	m
Koefisien Dispersi Sb. X	0,01	m ² /dt
Jarak antar titik Sb. Z (dz)	1	m

Gambar 3.10. Tampilan Form *Ubah Masukan Data* untuk Penyelesaian Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

b. Kondisi Awal dan Kondisi Batas

Berfungsi untuk menentukan kondisi dari tiap-tiap sel pada akuifer yang telah dibuat. Berikut ini merupakan tampilan form Kondisi Awal dan Kondisi batas:

Kategori	Range Sel	Nilai Konsentrasi (mg/L)	Tombol
Konsentrasi Awal (Porous Media)	[Dropdown]	[Text Box]	Tandai
Dinding (Impermeable)	[Dropdown]	[Text Box]	Tandai
Konsentrasi Titik (Dye)	[Dropdown]	[Text Box]	Tandai

Gambar 3.11. Tampilan Form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* untuk Penyelesaian Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

Pada kondisi awal, pengguna dapat memilih *range* sel pada akuifer. Kemudian mengisi nilai konsentrasi pada pilihan konsentrasi awal. Untuk menandai sel yang telah diberi kondisi awal, maka pengguna harus memilih tombol *Tandai*. Sehingga sel yang telah dipilih pada akuifer akan berubah warna menjadi warna biru.

Kemudian pada kondisi batas, pengguna dapat memasukkan nilai konsentrasi pada dinding yang *impermeable* dengan memilih range sel dan menekan tombol *Tandai*. Apabila tombol *Tandai* untuk kondisi batas telah ditekan, maka sel yang dipilih akan berubah warna menjadi abu-abu.

Sama halnya dengan kondisi awal dan kondisi batas, untuk memasukkan nilai konsentrasi *loading* (*dye*) yang berupa *continous loading* pengguna dapat memilih titik tertentu pada akuifer untuk dijadikan titik masuknya pencemar. setelah pengguna memilih titik dan mengisi nilai konsentrasi, pilih tombol *Tandai* agar sel yang telah dipilih pada akuifer berubah menjadi warna merah. Namun apabila pengguna ingin memasukkan pencemar yang berupa *spill loading*. Maka pengguna dapat langsung menuliskan di sel tertentu pada akuifer.

Adapun tombol pilihan *Hapus Semua* berfungsi untuk menghapus semua data yang telah dimasukkan. Sedangkan tombol *Kembali* berfungsi untuk kembali pada halaman aplikasi model.

c. Jalankan

Dengan menekan tombol ini, maka program akan melakukan perhitungan dengan penyelesaian metode analitik.

d. Grafik

Dengan menekan tombol ini, akan ditampilkan grafik konsentrasi pencemar yang berupa kontur konsentrasi.

3.4 Skenario Penjalanan Program Model Transpor Pencemar

Hasil yang ingin dicapai dari penjalanan Model Transpor Pencemar adalah nilai konsentrasi pencemar di masing-masing titik pada akuifer secara dua dimensi untuk setiap waktu tertentu. Oleh karena itu dibuat skenario simulasi program yang berbeda-beda untuk mengetahui *trend* nilai konsentrasi dari masing-masing skenario.

Adapun skenario simulasi yang dibuat antara lain:

a. Eksperimen 1

Adapun kondisi pada Eksperimen 1 sebagai berikut:

- Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 20 meter, lebar 20 meter, nilai $dx = 2$ meter dan $dz = 2$ meter. Batas atas dan bawah akuifer merupakan lapisan *impermeable*.
- Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 500, 600, dan 700 detik dengan $dt = 100$ detik.
- Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 10 m dan koefisien difusi diisi 10 (dalam 10^{-10}) $m^2/detik$.

b. Eksperimen 2

Berikut adalah penjelasan kondisi yang akan disimulasikan pada Eksperimen 2:

- Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 20 meter, lebar 20 meter, nilai $dx = 2$ meter dan $dz = 2$ meter. Batas atas dan bawah akuifer merupakan lapisan *impermeable*.

- Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 500, 600, dan 700 detik dengan $dt = 100$ detik.
- Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 10 m dan koefisien difusi (D^*) diisi dengan angka 0.

c. Eksperimen 3

Berikut adalah penjelasan kondisi yang akan disimulasikan pada Eksperimen 3:

- Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 20 meter, lebar 20 meter, nilai $dx = 2$ meter dan $dz = 2$ meter. Batas atas dan bawah akuifer merupakan lapisan *impermeable*.
- Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 500, 600, dan 700 detik dengan $dt = 100$ detik.
- Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 0 m dan koefisien difusi (D^*) diisi dengan angka 10.

BAB 4

SIMULASI MODEL TRANSPOR PENCEMAR

Program yang dibuat menggunakan *Visual Basic for Microsoft Excel* ini dapat memprediksi nilai konsentrasi pencemar dalam kondisi *steady* maupun *unsteady*. Kondisi *unsteady* dapat dicapai dengan memasukkan parameter waktu ke dalam model dengan nilai yang relatif kecil (nilai $t \ll$). Dengan nilai t yang relatif kecil inilah akan terlihat perubahan nilai konsentrasi pencemar pada air tanah. Sedangkan untuk kondisi *steady*, digunakan parameter waktu yang relatif besar (nilai $t \gg$) sehingga nilai perubahan konsentrasi pada kondisi *steady* tidak signifikan (cenderung tetap).

Diperlukan beberapa tahapan yang dilakukan sebelum model dapat digunakan secara bebas. Hal ini dilakukan agar dapat mengetahui keluwesan program terhadap berbagai kondisi simulasi dari berbagai masalah yang mungkin terjadi pada kondisi nyata di lapangan. Tahapan-tahapan tersebut ialah:

- a. Verifikasi nilai konsentrasi pencemar untuk satu dimensi dimasing-masing titik yang akan dibandingkan dengan nilai konsentrasi dari solusi analitik.
- b. Eksperimen berbagai kondisi lapangan dimana hasil simulasi ditinjau terhadap pola konsentrasi secara teoritis
- c. Validasi nilai konsentrasi pencemar untuk dua dimensi di masing-masing titik yang akan dibandingkan dengan tingkah laku konsentrasi pencemar di lapangan.
- d. Sensitifitas nilai parameter dispersivitas (α) dan koefisien difusi (D^*) terhadap konsentrasi pencemar.

4.1 Verifikasi Model

Dalam tahapan pembuatan model matematik, perlu dilakukan verifikasi model sebelum model dapat digunakan secara bebas untuk berbagai skenario simulasi. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi program (numerik) dengan hasil perhitungan dengan solusi analitik. Dalam verifikasi ini dibuat dua jenis perbandingan hasil program (numerik) dengan hasil solusi analitik. Adapun dua perbandingan tersebut adalah:

- a. Perbandingan model transpor pencemar solusi analitik dengan solusi numerik terhadap jarak, dan
- b. Perbandingan model transpor pencemar solusi analitik dengan solusi numerik terhadap waktu

Selain dilakukan perbandingan terhadap jarak dan waktu, hasil konsentrasi juga dilihat pengaruhnya terhadap perbedaan nilai dari parameter dx dan dt . Namun sebelum dilakukan perbandingan tersebut, terlebih dahulu dijelaskan mengenai perhitungan masing-masing metode (analitik dan numerik) dengan menggunakan Model Transpor Pencemar pada subbab 4.1.1 dan 4.1.2.

4.1.1 Model Transpor Pencemar Dengan Solusi Analitik

Untuk mendapatkan nilai konsentrasi solusi analitik, Model Transpor Pencemar menggunakan Persamaan 4.1. Dimana konsentrasi pencemar hanya ditinjau dalam satu dimensi (sumbu X) dengan menggunakan asumsi sebagai berikut:

- Loading yang masuk ke dalam akuifer berupa *step loading*.
- Nilai koefisien dispersi dianggap sama baik untuk sumbu X maupun sumbu Z.
- Aliran air tanah mengalir dari hulu (kiri) ke hilir (kanan) sehingga kecepatan aliran hanya searah sumbu X.

Persamaan 4.1 mengekspresikan solusi analitik untuk menghitung nilai konsentrasi pencemar pada satu dimensi.

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-ut}{\sqrt{4Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x+ut}{\sqrt{4Dt}} \right) \exp \left(\frac{ux}{D} \right) \right] \quad (4.1)$$

Dimana:

C_0 = konsentrasi awal pencemar (*loading*) [mg/L]

x = jarak antara titik yang di tinjau dengan titik masuk *loading* [m]

u = kecepatan aliran air tanah [m/detik]

D = koefisien dispersi [m²/detik]

t = waktu penulsuran [detik]

Adapun kondisi akuifer yang akan dihitung nilai konsentrasi pencemarnya adalah sebagai berikut:

- a. Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 15 meter, lebar 1 meter, nilai $dx = 1$ meter dan $dz = 1$ meter.

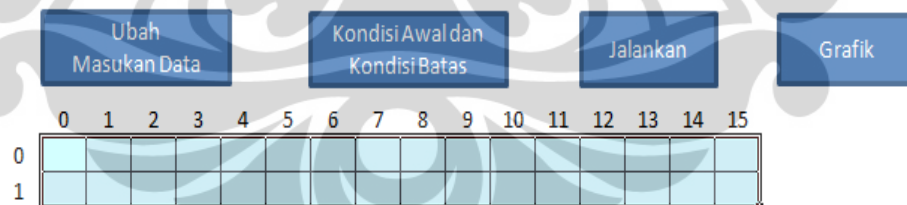
- b. Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 86400 detik.
- c. Nilai koefisien dispersi sumbu X = $0,000100001 \text{ m}^2/\text{detik}$ dan kecepatan uniform diisi pada form dengan nilai 1 (dalam 10^{-5}) m/detik.

Kemudian dengan menggunakan aplikasi Model Transpor Pencemar untuk penyelesaian analitik, dimasukkan data parameter dan variabel di atas seperti Gambar 4.1.

Gambar 4.1. Tampilan Form Data Parameter Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

Apabila tombol *Jalankan* dipilih, akan tampil halaman model dengan penyelesaian metode analitik beserta akuifer berupa grid yang dibuat secara otomatis.



Gambar 4.2. Tampilan Grid pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

Dari Gambar 4.2, dilakukan pengisian nilai konsentrasi dengan memilih tombol *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* dan muncul form yang diisi sebagai berikut:

- Sel paling kiri menjadi titik masuk pencemar (*loading*) dengan nilai konsentrasi 100 mg/L.
- Sel lainnya memiliki konsentrasi awal 0 mg/L.

Gambar 4.3. Tampilan Form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

Sehingga tampilan grid pada halaman model menjadi seperti Gambar 4.4.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.4. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

Dengan menekan tombol *Jalankan* pada halaman model, nilai konsentrasi di tiap titik yang akan tampil di halaman model analitik seperti Gambar 4.5 (dengan pembulatan satu angka di belakang koma):

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	100	85	69	54	41	29	20	13	8	4,7	2,6	1,4	0,7	0,3	0,1	0,1
1	100	85	69	54	41	29	20	13	8	4,7	2,6	1,4	0,7	0,3	0,1	0,1

Gambar 4.5. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

4.1.2 Model Transpor Pencemar Dengan Solusi Numerik

Adapun kondisi akuifer yang akan dihitung nilai konsentrasi pencemarnya adalah sebagai berikut:

- Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 15 meter, lebar 1 meter, nilai $dx = 1$ meter dan $dz = 1$ meter.
- Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 86400 detik dengan $dt = 100$ detik.
- Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 10 m dan koefisien difusi diisi 10 (dalam 10^{-10}) $m^2/detik$.

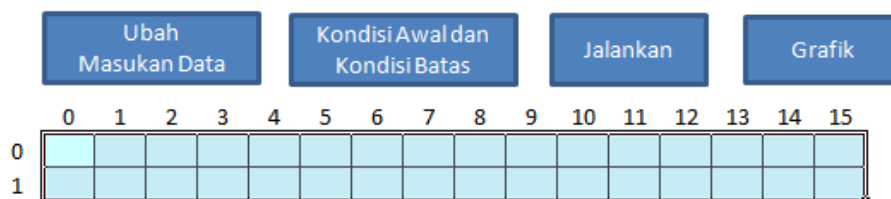
Kemudian dengan menggunakan aplikasi Model Transpor Pencemar untuk penyelesaian numerik, dimasukkan data parameter dan variabel di atas seperti Gambar 4.6.

Parameter	Value	Unit
Panjang Akuifer	15	m
Lebar Akuifer	1	m
Jarak antar titik Sb. X (dx)	1	m
Jarak antar titik Sb. Z (dz)	1	m
Waktu Penelusuran	86400	dtk
Jarak antar waktu (dt)	100	dtk
Dispersivitas	10	m
Koefisien Difusi (dalam 10^{-10})	10	m^2/dt

Gambar 4.6. Tampilan Form Data Parameter Simulasi Verifikasi untuk Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

Setelah itu akan tampil halaman model dengan penyelesaian metode numerik beserta akuifer berupa grid yang telah dibuat (Gambar 4.7).



Gambar 4.7. Tampilan Grid pada Simulasi Verifikasi Model untuk

Sumber: Olahan Penulis

Dari grid di atas (Gambar 4.7), dilakukan pengisian nilai konsentrasi dengan memilih tombol Kondisi Awal dan Kondisi Batas dan muncul form yang diisi sebagai berikut:

- Sel paling kiri menjadi titik masuk pencemar (*loading*) dengan nilai konsentrasi 100 mg/L.
- Sel lainnya memiliki konsentrasi awal 0 mg/L.

The image shows a dialog box titled 'Kondisi Awal dan Kondisi Batas'. It contains three rows of input fields and buttons:

Konsentrasi Awal (Porous Media)	<input type="text" value="0"/>	mg/L	<input type="button" value="Tandai"/>
Dinding (Impermeable)	<input type="text"/>	mg/L	<input type="button" value="Tandai"/>
Konsentrasi Titik (Dye)	<input type="text" value="100"/>	mg/L	<input type="button" value="Tandai"/>

At the bottom of the dialog box are two buttons: 'Hapus Semua' and 'Kembali'.

Gambar 4.8. Tampilan Form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Analitik

Sumber: Olahan Penulis

Sehingga tampilan grid pada halaman model menjadi seperti Gambar 4.9.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.9. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

Kemudian masukkan nilai kecepatan untuk arah X sebesar 0,00001 dengan satuan m/detik (karena satu dimensi, kecepatan Z dianggap tidak ada/nol) secara manual pada setiap sel seperti Gambar 4.10.

		KECEPATAN X															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	<input type="button" value="Kembali"/>	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
1		0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001

Gambar 4.10. Tampilan Halaman *Input Kecepatan X* pada Verifikasi Model Transpor Pencemar

Sumber: Olahan Penulis

Dengan menekan tombol *Kembali*, maka aplikasi akan kembali ke halaman model. Setelah itu pilih tombol *Jalankan* pada halaman model, nilai konsentrasi di tiap titik yang akan tampil di halaman model numerik seperti Gambar 4.11 (dengan pembulatan satu angka di belakang koma).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	100	86	73	62	52	43	35	29	24	19	16	13	11	9,6	8,9	8,6
1	100	86	73	62	52	43	35	29	24	19	16	13	11	9,6	8,9	8,6

Gambar 4.11. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Verifikasi Model untuk Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

4.1.3 Perbandingan Model Transpor Pencemar Solusi Analitik Dengan Solusi Numerik Terhadap Jarak

Dari hasil yang dikeluarkan pada saat simulasi baik dengan menggunakan metode analitik maupun metode numerik, maka dapat dibuat tabel

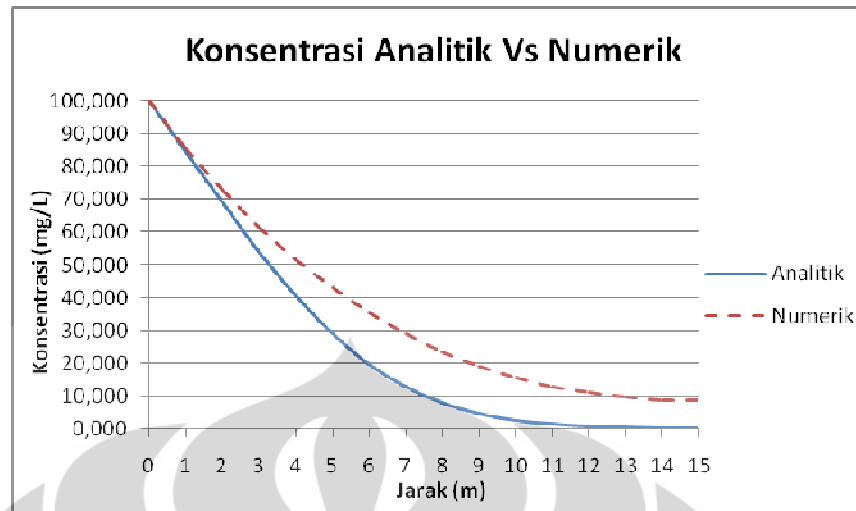
dan grafik perbandingan antara hasil metode analitik dengan metode numerik (dengan tiga angka di belakang koma).

Tabel 4.1. Perbandingan Nilai Konsentrasi Tiap Titik Hasil Metode Analitik dengan Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

Jarak (m)	Konsentrasi (mg/L)	
	Analitik	Numerik
0	100,000	100,000
1	84,826	85,850
2	69,208	73,102
3	54,167	61,726
4	40,579	51,683
5	29,041	42,919
6	19,823	35,367
7	12,888	28,952
8	7,972	23,591
9	4,687	19,200
10	2,616	15,690
11	1,386	12,978
12	0,697	10,983
13	0,332	9,634
14	0,150	8,863
15	0,064	8,615

Apabila disajikan ke dalam grafik, maka nilai konsentrasi pencemar antara hasil metode analitik dengan metode numerik seperti Gambar 4.12.



Gambar 4.12. Grafik Perbandingan Nilai Konsentrasi Tiap Titik Hasil Metode Analitik dengan Metode Numerik

Sumber: Olahan Penulis

Terlihat dari Gambar 4.12, nilai konsentrasi hasil metode numerik berada di atas hasil metode analitik. Walaupun demikian, nilai konsentrasi hasil numerik masih dalam pola yang sama dengan hasil metode analitik. Pola konsentrasi ini sesuai dengan teori yaitu semakin jauh jarak titik tinjau dari titik masuk *loading* maka akan semakin turun nilai konsentrasi yang terjadi.

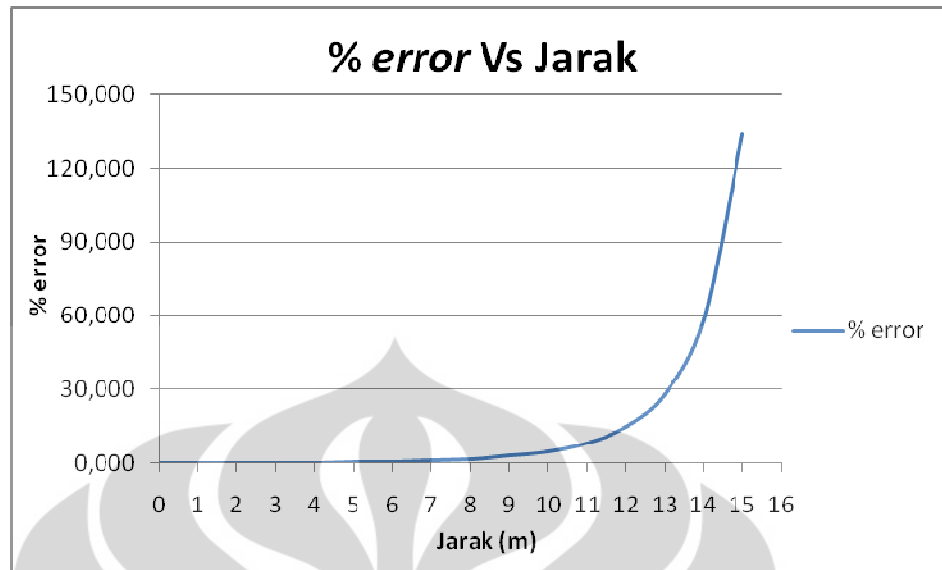
Kemudian agar dapat lebih jelas mengetahui selisih nilai konsentrasi antara hasil metode analitik dengan metode numerik, maka dibuat perhitungan nilai % *error* antara kedua nilai konsentrasi tersebut.

Tabel 4.2 Nilai % *Error* pada Tiap Titik

Sumber: Olahan Penulis

Jarak (m)	% <i>error</i>
0	0,000
1	0,012
2	0,056
3	0,140
4	0,274
5	0,478
6	0,784
7	1,246
8	1,959
9	3,097
10	4,997
11	8,362
12	14,769
13	28,040
14	58,208
15	133,655

Apabila disajikan ke dalam grafik, maka nilai % *error* jarak setiap titik adalah seperti pada Gambar 4.13. Pada gambar tersebut terlihat bahwa besar % *error* semakin besar untuk jarak yang juga semakin membesar (menjauh dari titik *loading*). Nilai % *error* yang paling besar mencapai 133,655 % pada jarak 15 meter dari *loading*.



Gambar 4.13. Grafik Nilai % *Error* pada Tiap Titik

Sumber: Olahan Penulis

4.1.4 Perbandingan Model Transpor Pencemar Solusi Analitik dengan Solusi Numerik Terhadap Waktu

Dengan demikian hasil simulasi verifikasi antara solusi analitik dengan solusi numerik, dibuat perbandingan nilai konsentrasi yang dibandingkan terhadap waktu. Adapun waktu yang diatur pada saat simulasi adalah pada saat $t = 20000$ detik, 40000 detik, 60000 detik, dan 80000 detik.

Untuk nilai konsentrasi (satu angka di belakang koma) hasil solusi analitik pada saat $t = 20000$ detik, 40000 detik, 60000 detik, dan 80000 detik dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Nilai Konsentrasi Solusi Analitik (dalam mg/L)

Sumber: Olahan Penulis

Waktu (detik)	Jarak (m)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20000	100	65	35	15	5,5	1,6	0,4	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
40000	100	76	53	33	19	9,8	4,5	1,9	0,7	0,2	0,1	0	0	0	0	0
60000	100	81	62	45	30	19	11	6,1	3,1	1,5	0,6	0,3	0,1	0	0	0
80000	100	84	68	52	38	27	18	11	6,7	3,8	2	1	0,5	0,2	0,1	0

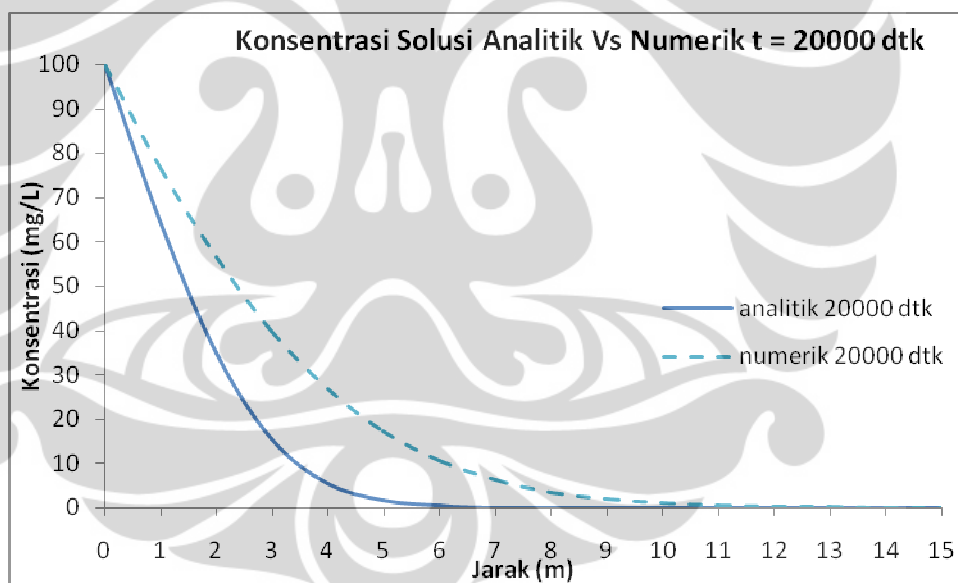
Kemudian untuk nilai konsentrasi (satu angka di belakang koma) hasil solusi numerik pada saat $t = 20000$ detik, 40000 detik, 60000 detik, dan 80000 detik dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Nilai Konsentrasi Solusi Numerik (dalam mg/L)

Sumber: Olahan Penulis

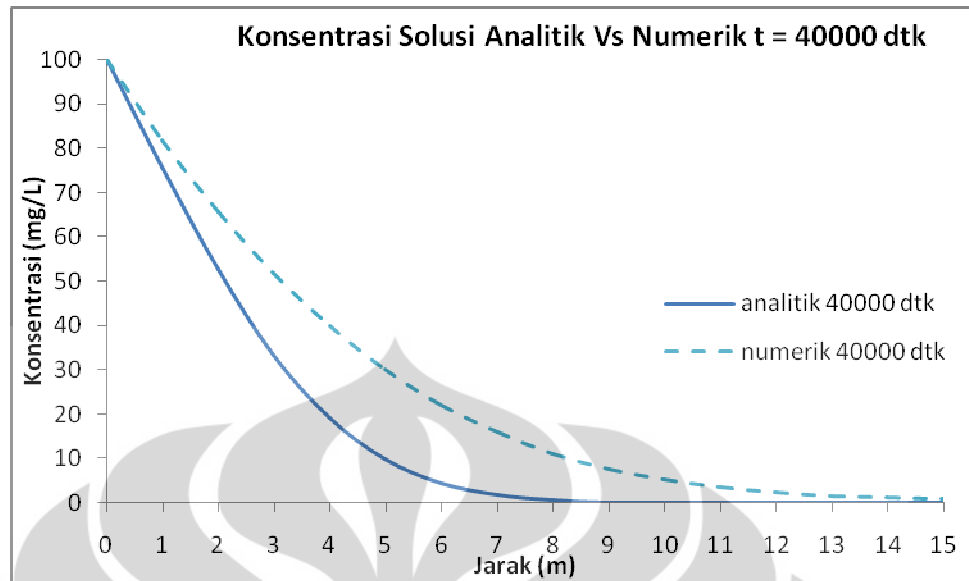
Waktu (detik)	Jarak (m)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20000	100	77	56	40	27	17	11	6,3	3,5	1,9	1	0,5	0,2	0,1	0,1	0
40000	100	82	66	52	40	30	22	16	11	7,7	5,2	3,4	2,3	1,6	1,2	1,1
60000	100	84	70	57	46	37	29	23	17	13	9,9	7,5	5,7	4,6	3,9	3,7
80000	100	86	72	61	51	42	34	28	22	18	14	12	9,7	8,4	7,6	7,4

Selanjutnya apabila nilai konsentrasi solusi analitik dibandingkan dengan solusi numerik pada tiap waktu tertentu akan terlihat seperti Gambar 4.14, 4.15, 4.16, dan 4.17.



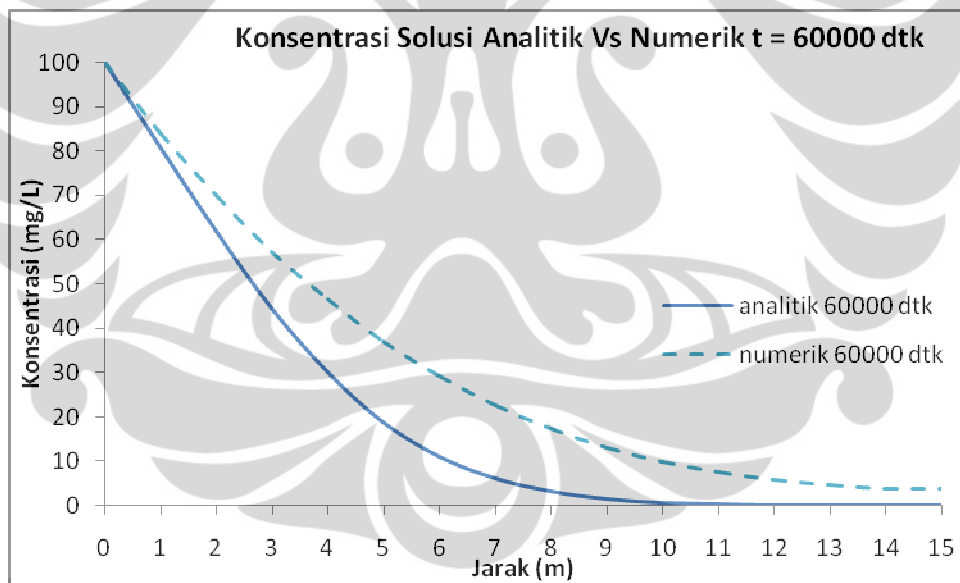
Gambar 4.14 Konsentrasi Solusi Analitik dengan Numerik pada Saat $t = 20000$ detik

Sumber: Olahan Penulis



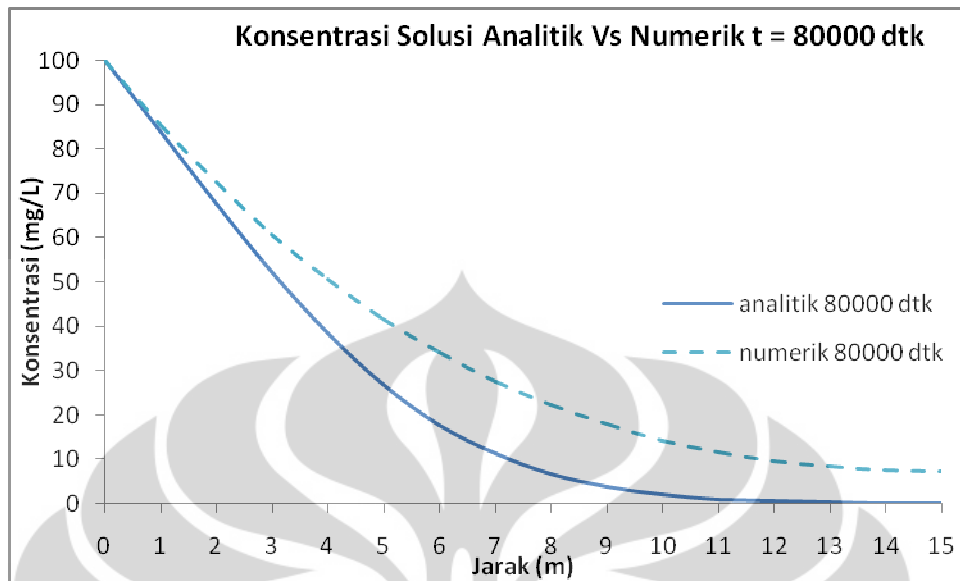
Gambar 4.15 Konsentrasi Solusi Analitik dengan Numerik pada Saat $t = 40000$ detik

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 4.16 Konsentrasi Solusi Analitik dengan Numerik pada Saat $t = 60000$ detik

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 4.17 Konsentrasi Solusi Analitik dengan Numerik pada Saat $t = 80000$ detik

Sumber: Olahan Penulis

Berdasarkan Gambar 4.14, 4.15, 4.16, dan 4.17 nilai konsentrasi hasil solusi numerik selalu berada di atas nilai konsentrasi hasil analitik. Namun pola konsentrasi yang dihasilkan oleh solusi numerik sama dengan hasil solusi analitik, yaitu konsentrasi menurun untuk titik yang semakin jauh dari titik masuk *loading*. Hal ini dapat dikarenakan nilai parameter dan variabel yang dipilih seperti dx , dt , α , dan D^* kurang tepat. Oleh karena itu sebagai usaha mengetahui perilaku konsentrasi pencemar dilakukan tahap simulasi berikutnya yaitu simulasi eksperimen sedangkan untuk memperbaiki hasil dan mengetahui perilaku konsentrasi dari model dilakukan tahap simulasi validasi dan sensitivitas parameter dan variabel.

4.1.5 Pengaruh Parameter dx

Setelah dilakukan perbandingan hasil solusi analitik dengan hasil numerik dari Model Transpor pencemar, dilakukan peninjauan terhadap pengaruh perbedaan nilai parameter dx . Nilai dx yang dipilih dalam melakukan simulasi adalah 0,5 meter, 1 meter, dan 3 meter. Nilai tersebut dipilih karena dinilai dapat

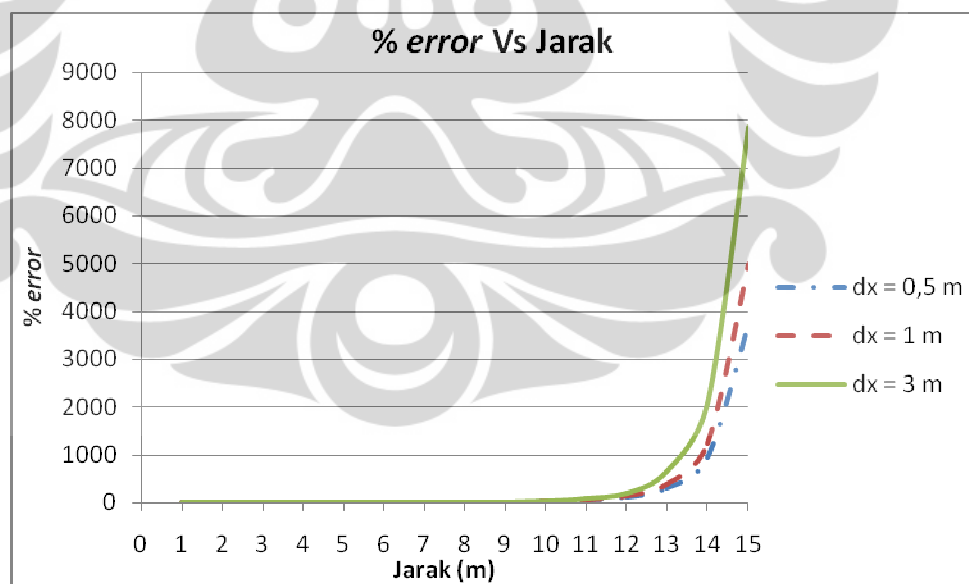
merepresentasikan pengaruh nilai dx terhadap nilai konsentrasi yang dihasilkan. Kemudian apabila diambil nilai dx lebih kecil dari 0,5 meter (seperti 0,25 meter maupun 0,125 meter) tidak akan menghasilkan nilai konsentrasi yang sesuai. Hal ini disebabkan pada persamaan solusi analitik terdapat suku yang berisi nilai *error function* (*ErfC*) dimana nilai *ErfC* memiliki keterbatasan (dapat menghasilkan *error #NUM!* maupun *#VALUE!*).

Kemudian hasil nilai konsentrasi dari simulasi model numerik tersebut dibandingkan dengan hasil solusi analitik dan dihitung nilai % *error* di antaranya seperti pada tabel 4.5. Apabila nilai % *error* untuk parameter dx diplot ke dalam grafik, akan terlihat seperti Gambar 4.14.

Tabel 4.5. Nilai % *Error* Parameter dx Terhadap Jarak (m)

Sumber: Olahan Penulis

dx (m)	Jarak (m)															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,5 m	0	0	0,2	0,4	0,7	1,2	2,2	3,8	6,8	13	25	51	117	304	943	3718
1 m	0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,3	2,4	4,2	7,6	14	28	61	144	388	1245	4993
3 m	0	0,1	0,2	0,4	1	1,4	2,7	5,4	8,7	17	41	82	200	653	2064	7840



Gambar 4.18 Nilai % *Error* Parameter dx Terhadap Jarak (m)

Sumber: Olahan Penulis

Dari Tabel 4.5 dan Gambar 4.18 terlihat bahwa nilai % *error* semakin besar untuk nilai dx yang makin besar. Kemudian untuk parameter $dx = 0,5$ m bernilai paling kecil, yaitu 3718 % (pada jarak terjauh, 15 meter). Oleh karena itu nilai parameter dx yang paling sesuai untuk kondisi satu dimensi adalah $dx = 0,5$ meter.

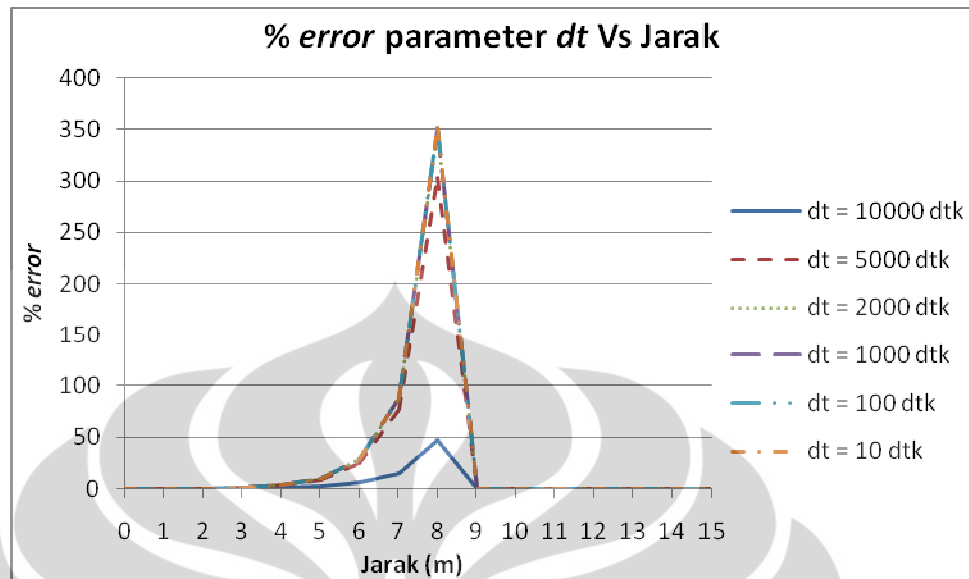
4.1.6 Pengaruh Parameter dt

Setelah mengetahui pengaruh parameter dt terhadap hasil nilai konsentrasi, dilakukan peninjauan terhadap pengaruh perbedaan nilai parameter dt . Nilai dt yang dipilih dalam melakukan simulasi adalah 10 detik, 100 detik, 1000 detik, 2000 detik, 5000 detik, dan 10000 detik. Sama halnya seperti peninjauan pengaruh parameter dx , parameter dt dihitung nilai % *error* nilai konsentrasi solusi numerik dengan solusi analitik (Tabel 4.6).

Tabel 4.6 Nilai % *error* Parameter dt Terhadap Jarak (m)

Sumber: Olahan Penulis

dt (detik)	Jarak (m)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
10000	0	0,0577	0,2084	0,5294	1,2004	2,6792	6,3611	15	47
5000	0	0,1742	0,5752	1,4602	3,5289	8,9308	25,389	77	303
2000	0	0,1825	0,6089	1,5604	3,8141	9,7925	28,278	87	346
1000	0	0,1834	0,6128	1,5723	3,847	9,8899	28,617	89	351
100	0	0,1836	0,6141	1,576	3,8574	9,9245	28,722	89	352
10	0	0,1836	0,6141	1,576	3,8574	9,9245	28,722	89	352



Gambar 4.19. % Error Parameter dt Terhadap Jarak

Sumber: Olahan Penulis

Apabila nilai % error untuk parameter dt diplot ke dalam grafik, akan terlihat seperti Gambar 4.19.

Dari Tabel 4.6 dan Gambar 4.19 terlihat bahwa nilai % error semakin besar untuk nilai dt yang makin kecil. Kemudian untuk parameter $dt = 10000$ detik bernilai paling kecil, yaitu 47 % (pada jarak terjauh, 15 meter). Hal ini dikarenakan penggunaan metode *Runge-Kutta* orde 4 pada Model Transpor Pencemar. Metode ini memungkinkan pengguna memakai nilai dt yang sangat besar dengan nilai % error yang dihasilkan lebih kecil. Oleh karena itu nilai parameter dt yang paling sesuai untuk kondisi satu dimensi adalah $dt = 10000$ detik.

4.2 Eksperimen Model

Untuk mengetahui apakah model yang telah dibuat dapat digunakan untuk berbagai kondisi dilakukan berbagai skenario simulasi. Adapun beberapa skenario simulasi yang dirancang antara lain:

4.2.1 Eksperimen 1

Tujuan dari eksperimen ini adalah mengetahui nilai konsentrasi di masing-masing titik akibat adveksi dan dispersi (baik proses *mechanical mixing*

maupun difusi). Kondisi aliran tanah yang terjadi dianggap bergerak dari kiri ke kanan dengan dinding bagian atas dan bawah merupakan lapisan *impermeable*.

Berikut adalah penjelasan kondisi yang akan disimulasikan pada Eksperimen 1:

- Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 20 meter, lebar 20 meter, nilai $dx = 2$ meter dan $dz = 2$ meter. Batas atas dan bawah akuifer merupakan lapisan *impermeable*.
- Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 500, 600, dan 700 detik dengan $dt = 10$ detik.
- Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 10 m dan koefisien difusi diisi 10 (dalam 10^{-10}) $m^2/detik$.

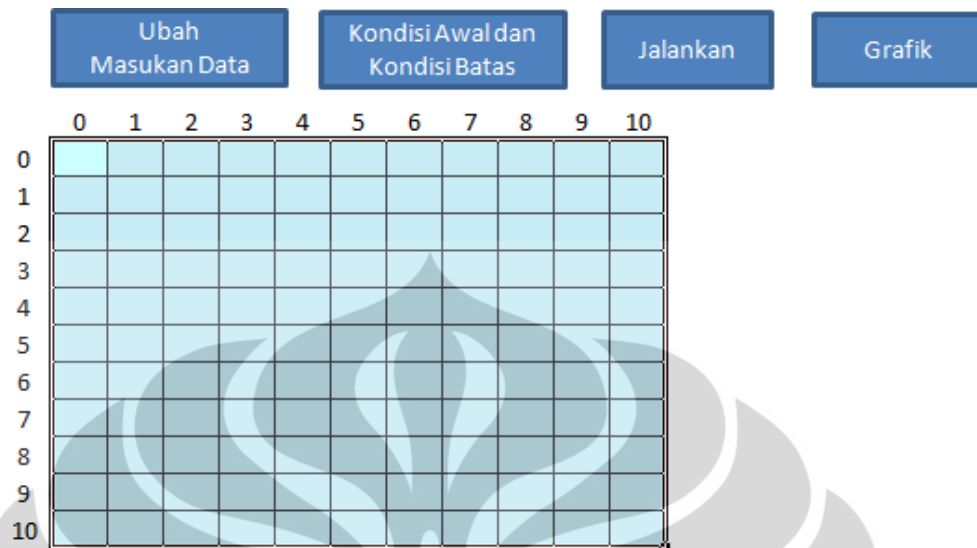
Dengan masuk pada aplikasi program *Model Transpor Pencemar* dan memilih sub program *Metode Numerik*, maka form data parameter dan variabel diisi seperti pada Gambar 4.20.

The screenshot shows a software window titled "Model Transpor Pencemar" with a close button (X) in the top right corner. The window contains several input fields and labels arranged in two columns. The left column includes: "Panjang Akuifer" (20 m), "Lebar Akuifer" (20 m), "Jarak antar titik Sb, X (dx)" (2 m), and "Jarak antar titik Sb, Z (dz)" (2 m). The right column includes: "Waktu Penelusuran" (500 dtk), "Jarak antar waktu (dt)" (100 dtk), "Dispersivitas" (10 m), and "Koefisien Difusi" (10 m²/dtk). At the bottom of the window, there are two buttons: "Hapus Semua" and "OK".

Gambar 4.20. Tampilan Form Data Parameter dan Variabel pada Simulasi Ekperimen 1

Sumber: Olahan Penulis

Kemudian tampil halaman model dengan grid seperti Gambar 4.21.



Gambar 4.21. Tampilan Grid pada Simulasi Ekperimen 1

Sumber: Olahan Penulis

Setelah menekan tombol *Input Kecepatan X* dan *Input Kecepatan Z*, data parameter dan variabel kecepatan yang berasal dari hasil dari GWFM 2012 dimasukkan ke dalam model.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-0,0007	-0,0008	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0008	-0,0006	0,00052
1	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00092
2	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00088
3	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
4	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
5	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
6	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
7	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
8	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00088
9	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00092
10	-0,0007	-0,0008	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0008	-0,0006	0,00052

Gambar 4.22. Tampilan *Input Kecepatan X* pada Eksperimen 1

Sumber: Olahan Penulis

Kembali

KECEPATANZ

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0007	0,000155	4E-05	1,5E-05	5E-06	0	-5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-0,000115	-0,000515
1	0,00035	0,000105	3,5E-05	1,5E-05	5E-06	0	-2,5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-7,5E-05	-0,0002575
2	0	3,75E-05	2,5E-05	1,25E-05	5E-06	2,5E-06	-2,5E-06	-7,5E-06	-1,75E-05	-2,5E-05	0
3	0	1,25E-05	1,5E-05	7,5E-06	5E-06	2,5E-06	-2,5E-06	-5E-06	-7,5E-06	-1E-05	0
4	0	5E-06	5E-06	5E-06	2,5E-06	0	0	-2,5E-06	-5E-06	-2,5E-06	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	-5E-06	-5E-06	-5E-06	-2,5E-06	0	0	2,5E-06	5E-06	2,5E-06	0
7	0	-1,25E-05	-1,5E-05	-7,5E-06	-5E-06	-2,5E-06	2,5E-06	5E-06	7,5E-06	1E-05	0
8	0	-3,75E-05	-2,5E-05	-1,25E-05	-5E-06	-2,5E-06	2,5E-06	7,5E-06	1,75E-05	2,5E-05	0
9	-0,00035	-0,000105	-3,5E-05	-1,5E-05	-5E-06	0	2,5E-06	1E-05	2,5E-05	7,5E-05	0,0002575
10	0,0007	0,000155	4E-05	1,5E-05	5E-06	0	-5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-0,000115	-0,000515

Gambar 4.23. Tampilan *Input Kecepatan Z* pada Eksperimen 1

Sumber: Olahan Penulis

Pengaturan pada tombol pilihan *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* (Gambar 4.24) disesuaikan dengan kondisi yang akan disimulasikan sehingga tampilan halaman model menjadi seperti Gambar 4.25.

Kondisi Awal dan Kondisi Batas

Konsentrasi Awal (Porous Media) mg/L

Dinding (Impermeable) mg/L

Konsentrasi Titik (Dye) mg/L

Gambar 4.24. Tampilan Form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* pada Eksperimen 1

Sumber: Olahan Penulis

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.25. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Eksperimen 1

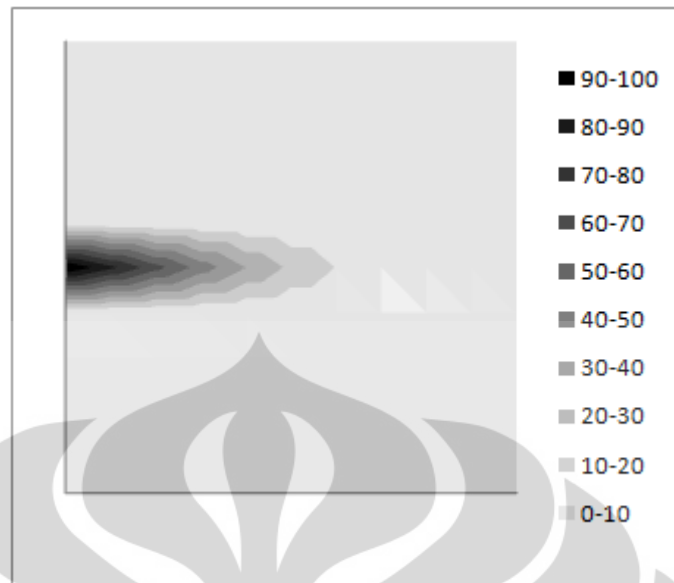
Sumber: Olahan Penulis

Kemudian setelah tombol *Jalankan* dipilih, hasil konsentrasi pencemar di masing-masing titik akan tampak seperti Gambar 4.26, 4.27, dan 4.28. Apabila nilai hasil konsentrasi pencemar tersebut dibuat kontur yang diplot ke dalam grafik, maka penjarangan pencemar yang terjadi setelah 500 detik, 600 detik, dan 700 detik adalah seperti Gambar 4.26, 4.27, dan 4.28.

a. Pada saat $t = 500$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,7	0,8	0,7	0,6	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0
5	100	83	64	46	30	18	9,8	4,8	2,2	1	0,6
6	0,9	1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

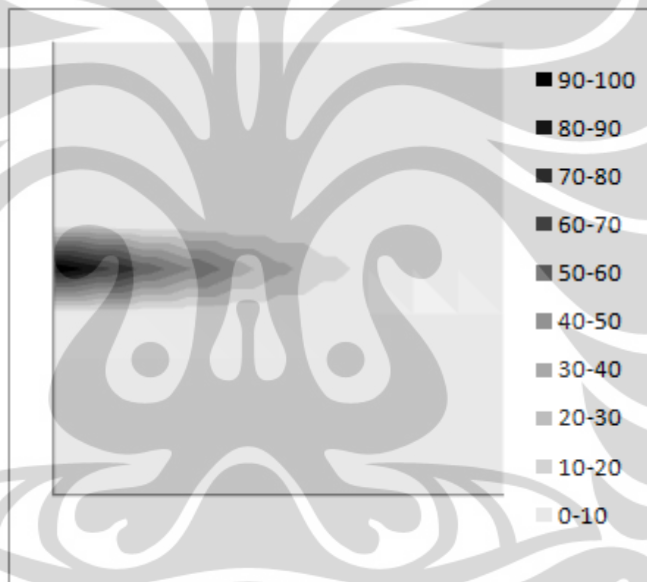
Gambar 4.26. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran
Pencemar pada Eksperimen 1 saat $t = 500$ detik

Sumber: Olahan Penulis

b. Pada saat $t = 600$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,9	1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0	0
5	100	85	68	51	36	23	14	7,6	3,9	2	1,4
6	1,1	1,2	1,1	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

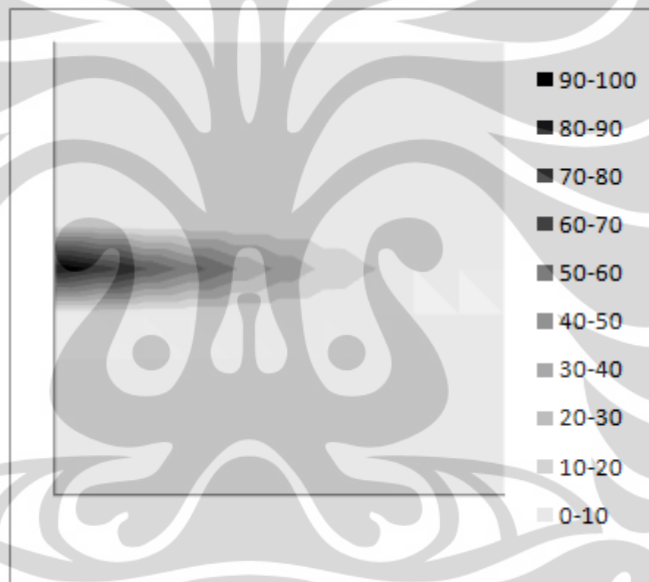
Gambar 4.27. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran
Pencemar pada Eksperimen 1 saat $t = 600$ detik

Sumber: Olahan Penulis

c. Pada saat $t = 700$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1,1	1,2	1,1	0,9	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0
5	100	87	71	56	41	28	18	11	6	3,5	2,6
6	1,4	1,4	1,4	1,1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

Gambar 4.28. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 1 saat $t = 700$ detik

Sumber: Olahan Penulis

Berdasarkan Gambar 4.26, 4.27, dan 4.28 penjalaran konsentrasi pencemar bergerak sesuai dengan arah kecepatan yang mengarah dari hulu (kiri) ke hilir (kanan). Hal ini menunjukkan bahwa pola penjalaran pencemar sesuai dengan teori untuk kondisi Ekperimen 1, yaitu pergerakan pencemar dipengaruhi oleh adveksi dan dispersi (proses *mechanical mixing* dan difusi).

4.2.2 Eksperimen 2

Tujuan dari Eksperimen 2 adalah mengetahui nilai konsentrasi di masing-masing titik akibat adveksi dan dispersi. Namun pengaruh dispersi yang disimulasikan hanya proses *mechanical mixing* saja, sehingga proses difusi dianggap tidak ada atau tidak berpengaruh. Kondisi aliran tanah yang terjadi dianggap bergerak dari kiri ke kanan dengan dinding bagian atas dan bawah merupakan lapisan *impermeable*.

Berikut adalah penjelasan kondisi yang akan disimulasikan pada Eksperimen 2:

- Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 20 meter, lebar 20 meter, nilai $dx = 2$ meter dan $dz = 2$ meter. Batas atas dan bawah akuifer merupakan lapisan *impermeable*.
- Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 500, 600, dan 700 detik dengan $dt = 10$ detik.
- Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 10 m dan koefisien difusi (D^*) diisi dengan angka 0.

Dengan masuk pada aplikasi program *Model Transpor Pencemar* dan memilih sub program *Metode Numerik*, maka form data parameter dan variabel diisi seperti pada Gambar 4.29.

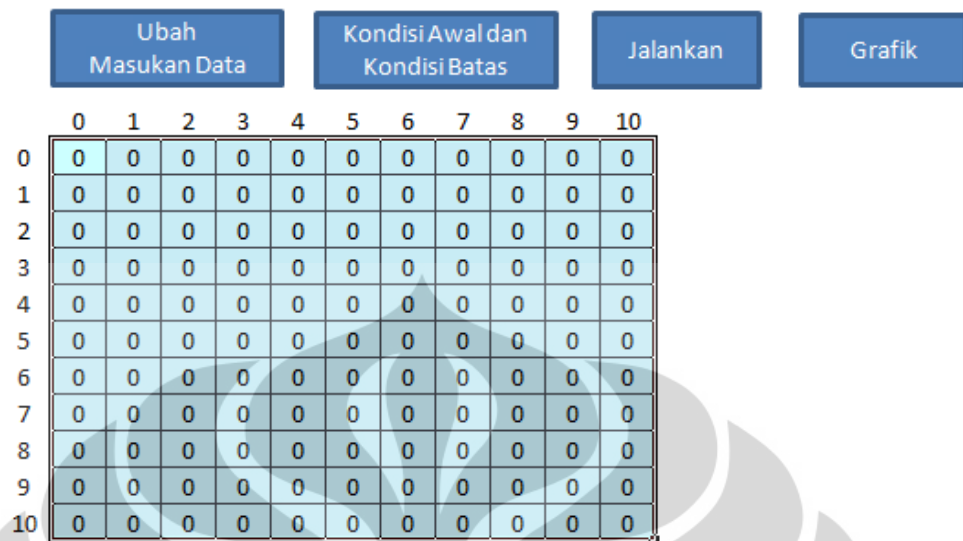
The screenshot shows a software window titled "Model Transpor Pencemar" with a close button (X) in the top right corner. The window contains several input fields arranged in two columns, each with a unit label to its right. At the bottom, there are two buttons: "Hapus Semua" and "OK".

Panjang Akuifer	20	m	Waktu Penelusuran	500	dtk
Lebar Akuifer	20	m	Jarak antar waktu (dt)	100	dtk
Jarak antar titik Sb. X (dx)	2	m	Dispersivitas	10	m
Jarak antar titik Sb. Z (dz)	2	m	Koefisien Difusi	0	m ² /dt

Gambar 4.29. Tampilan Form Data Parameter dan Variabel pada Simulasi Ekperimen 2

Sumber: Olahan Penulis

Kemudian tampil halaman model dengan grid seperti Gambar 4.30.

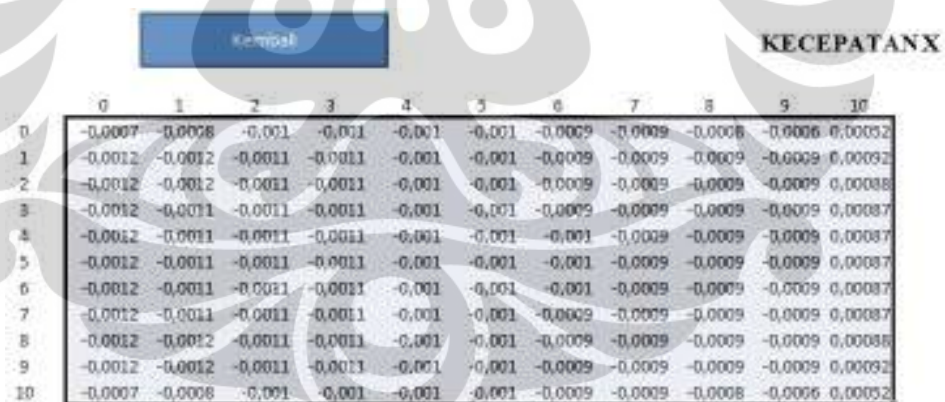


	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.30. Tampilan Grid pada Simulasi Ekperimen 2

Sumber: Olahan Penulis

Setelah menekan tombol *Input Kecepatan X* dan *Input Kecepatan Z*, data parameter dan variabel kecepatan yang berasal dari hasil dari GWFM 2012 dimasukkan ke dalam model.



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-0,0007	-0,0008	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0008	-0,0006	0,00032
1	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00092
2	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00088
3	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
4	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
5	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
6	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
7	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
8	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00088
9	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00092
10	-0,0007	-0,0008	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0008	-0,0006	0,00032

Gambar 4.31. Tampilan *Input Kecepatan X* pada Eksperimen 2

Sumber: Olahan Penulis

Kembali

KECEPATAN Z

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0007	0,000153	4E-05	1,5E-05	5E-06	0	-5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-0,000115	-0,000515
1	0,00035	0,000105	3,5E-05	1,5E-05	5E-06	0	-2,5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-7,5E-05	-0,0002375
2	0	3,75E-05	2,5E-05	1,25E-05	5E-06	2,5E-06	-2,5E-06	-7,5E-06	-1,75E-05	-2,5E-05	0
3	0	1,25E-05	1,5E-05	7,5E-06	5E-06	2,5E-06	-2,5E-06	-5E-06	-7,5E-06	-1E-05	0
4	0	5E-06	5E-06	5E-06	2,5E-06	0	0	-2,5E-06	-5E-06	-2,5E-06	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	-5E-06	-5E-06	-5E-06	-2,5E-06	0	0	2,5E-06	5E-06	2,5E-06	0
7	0	-1,25E-05	-1,5E-05	-7,5E-06	-5E-06	-2,5E-06	2,5E-06	5E-06	7,5E-06	1E-05	0
8	0	-3,75E-05	-2,5E-05	-1,25E-05	-5E-06	-2,5E-06	2,5E-06	7,5E-06	1,75E-05	2,5E-05	0
9	-0,00035	-0,000105	-3,5E-05	-1,5E-05	-5E-06	0	2,5E-06	1E-05	2,5E-05	7,5E-05	0,0002375
10	0,0007	0,000153	4E-05	1,5E-05	5E-06	0	-5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-0,000115	-0,000515

Gambar 4.32. Tampilan *Input Kecepatan Z* pada Eksperimen 2

Sumber: Olahan Penulis

Pengaturan pada tombol pilihan *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* (Gambar 4.33) disesuaikan dengan kondisi yang akan disimulasikan sehingga tampilan halaman model menjadi seperti Gambar 4.34.

Kondisi Awal dan Kondisi Batas

Konsentrasi Awal (Porous Media) mg/L

Dinding (Impermeable) mg/L

Konsentrasi Titik (Dye) mg/L

Gambar 4.33. Tampilan Form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* pada Eksperimen 2

Sumber: Olahan Penulis

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.34. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Eksperimen 2

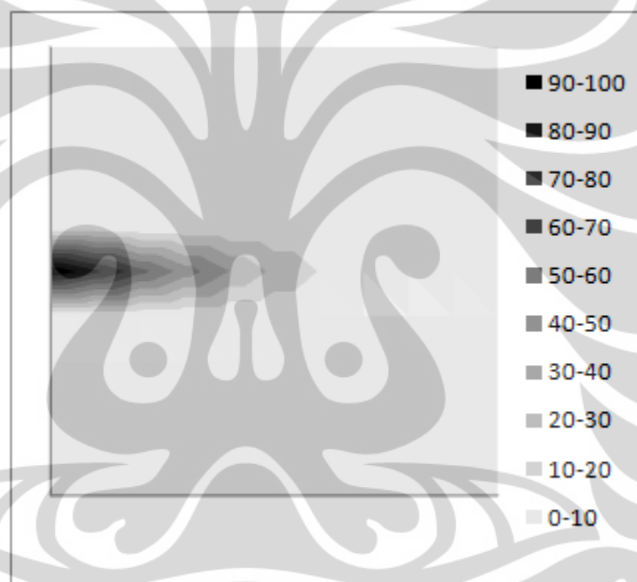
Sumber: Olahan Penulis

Kemudian setelah tombol *Jalankan* dipilih, hasil konsentrasi pencemar di masing-masing titik akan tampak seperti Gambar 4.35, 4.36, dan 4.37. Apabila nilai hasil konsentrasi pencemar tersebut dibuat kontur yang diplot ke dalam grafik, maka penjalaran pencemar yang terjadi setelah 500 detik, 600 detik, dan 700 detik adalah seperti Gambar 4.35, 4.36, dan 4.37.

a. Pada saat $t = 500$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,7	0,8	0,7	0,6	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0
5	100	83	64	46	30	18	9,8	4,8	2,2	1	0,6
6	0,9	1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

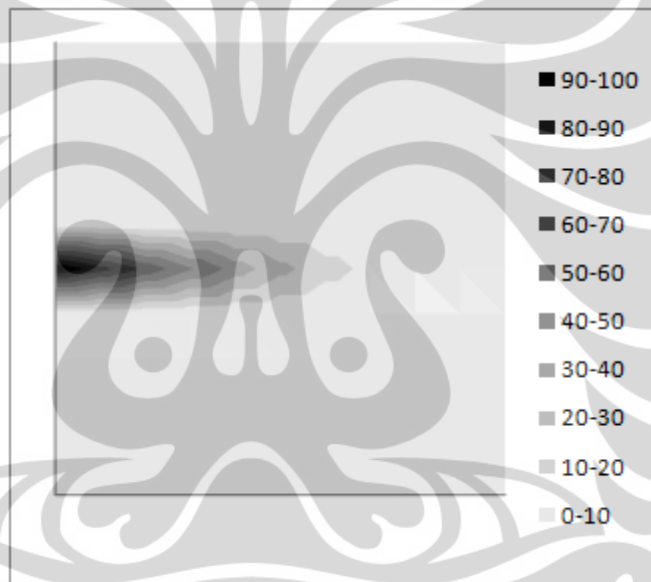
Gambar 4.35. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 2 saat $t = 500$ detik

Sumber: Olahan Penulis

b. Pada saat $t = 600$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,9	1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0	0
5	100	85	68	51	36	23	14	7,6	3,9	2	1,4
6	1,1	1,2	1,1	0,9	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

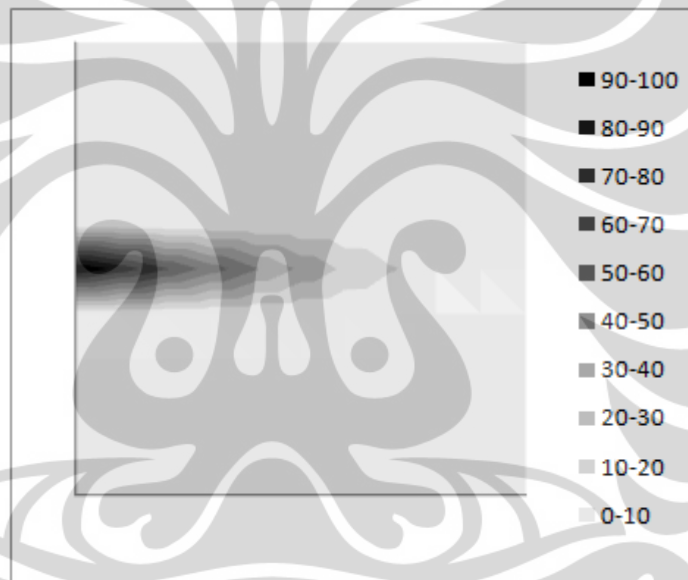
Gambar 4.36. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 2 saat $t = 600$ detik

Sumber: Olahan Penulis

c. Pada saat $t = 700$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1,1	1,2	1,1	0,9	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0
5	100	87	71	56	41	28	18	11	6	3,5	2,6
6	1,4	1,4	1,4	1,1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

Gambar 4.37. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 2 saat $t = 700$ detik

Sumber: Olahan Penulis

Berdasarkan Gambar 4.35, 4.36, dan 4.37 konsentrasi pencemar bergerak sesuai dengan arah kecepatan yang mengarah dari hulu (kiri) ke hilir (kanan). Hal ini menunjukkan pola penjalaran pencemar sesuai dengan teori untuk kondisi Ekperimen 2, yaitu gerak pencemar dipengaruhi oleh adveksi dan dispersi (proses *mechanical mixing* saja).

4.2.3 Eksperimen 3

Tujuan dari Eksperimen 3 adalah mengetahui nilai konsentrasi di masing-masing titik akibat adveksi dan dispersi. Namun pengaruh dispersi yang disimulasikan hanya proses difusi saja, sehingga proses *mechanical mixing* dianggap tidak ada atau tidak berpengaruh. Kondisi aliran tanah yang terjadi dianggap bergerak dari kiri ke kanan dengan dinding bagian atas dan bawah merupakan lapisan *impermeable*.

Berikut adalah penjelasan kondisi yang akan disimulasikan pada Eksperimen 3:

- a. Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 20 meter, lebar 20 meter, nilai $dx = 2$ meter dan $dz = 2$ meter. Batas atas dan bawah akuifer merupakan lapisan *impermeable*.
- b. Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 500, 600, dan 700 detik dengan $dt = 100$ detik.
- c. Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 0 m dan koefisien difusi (D^*) diisi dengan angka 10000.

Dengan masuk pada aplikasi program *Model Transpor Pencemar* dan memilih sub program *Metode Numerik*, maka form data parameter dan variabel diisi seperti pada Gambar 4.38.

Model Transpor Pencemar

Panjang Akuifer: 20 m Waktu Penelusuran: 500 dtk

Lebar Akuifer: 20 m Jarak antar waktu (dt): 100 dtk

Jarak antar titik Sb. X (dx): 2 m Dispersivitas: 10 m

Jarak antar titik Sb. Z (dz): 2 m Koefisien Difusi: 0 m²/dt

Hapus Semua OK

Gambar 4.38. Tampilan Form Data Parameter dan Variabel pada Simulasi Ekperimen 3

Sumber: Olahan Penulis

Kemudian tampil halaman model dengan grid seperti Gambar 4.39.

Ubah Masukan Data Kondisi Awal dan Kondisi Batas Jalankan Grafik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.39. Tampilan Grid pada Simulasi Ekperimen 3

Sumber: Olahan Penulis

Setelah menekan tombol *Input Kecepatan X* dan *Input Kecepatan Z*, data parameter dan variabel kecepatan yang berasal dari hasil dari GWFM 2012 dimasukkan ke dalam model.

		Kembali										KECEPATAN X
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-0,0007	-0,0008	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0008	-0,0006	0,00052
1	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00092
2	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00088
3	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
4	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
5	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
6	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
7	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00087
8	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00088
9	-0,0012	-0,0012	-0,0011	-0,0011	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	-0,0009	0,00092
10	-0,0007	-0,0008	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,0009	-0,0009	-0,0008	-0,0006	0,00052	

Gambar 4.40. Tampilan *Input Kecepatan X* pada Eksperimen 3

Sumber: Olahan Penulis

		Kembali										KECEPATAN Z
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0007	0,000155	4E-05	1,5E-05	5E-06	0	-5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-0,000115	-0,000515	
1	0,00035	0,000105	3,5E-05	1,5E-05	5E-06	0	-2,5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-7,5E-05	-0,0002375	
2	0	3,75E-05	2,5E-05	1,25E-05	5E-06	2,5E-06	-2,5E-06	-7,5E-06	-1,75E-05	-2,5E-05	0	
3	0	1,25E-05	1,5E-05	7,5E-06	5E-06	2,5E-06	-2,5E-06	-5E-06	-7,5E-06	-1E-05	0	
4	0	5E-06	5E-06	5E-06	2,5E-06	0	0	-2,5E-06	-5E-06	-2,5E-06	0	
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	-5E-06	-5E-06	-5E-06	-2,5E-06	0	0	2,5E-06	5E-06	2,5E-06	0	
7	0	-1,25E-05	-1,5E-05	-7,5E-06	-5E-06	-2,5E-06	2,5E-06	5E-06	7,5E-06	1E-05	0	
8	0	-3,75E-05	-2,5E-05	-1,25E-05	-5E-06	-2,5E-06	2,5E-06	7,5E-06	1,75E-05	2,5E-05	0	
9	-0,00035	-0,000105	-3,5E-05	-1,5E-05	-5E-06	0	2,5E-06	1E-05	2,5E-05	7,5E-05	0,0002375	
10	0,0007	0,000155	4E-05	1,5E-05	5E-06	0	-5E-06	-1E-05	-2,5E-05	-0,000115	-0,000515	

Gambar 4.41. Tampilan *Input Kecepatan Z* pada Eksperimen 3

Sumber: Olahan Penulis

Pengaturan pada tombol pilihan *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* disesuaikan dengan kondisi yang akan disimulasikan sehingga tampilan halaman model menjadi seperti Gambar 4.42 dan 4.43.

Kondisi Awal dan Kondisi Batas

Konsentrasi Awal (Porous Media) mg/L

Dinding (Impermeable) mg/L

Konsentrasi Titik (Dye) mg/L

Gambar 4.42. . Tampilan Form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* pada Eksperimen 3

Sumber: Olahan Penulis

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.43. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Eksperimen 3

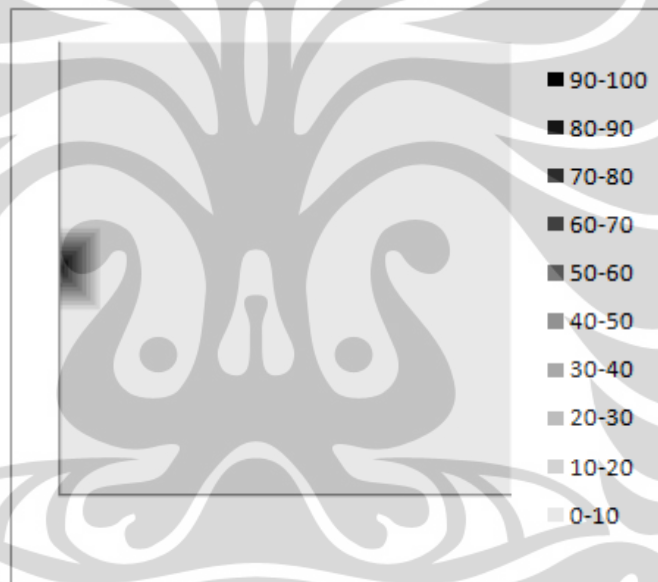
Sumber: Olahan Penulis

Kemudian setelah tombol *Jalankan* dipilih, hasil konsentrasi pencemar di masing-masing titik akan tampak seperti Gambar 4.44, 4.45, dan 4.46. Apabila nilai hasil konsentrasi pencemar tersebut dibuat kontur yang diplot ke dalam grafik, maka penjalaran pencemar yang terjadi setelah 500 detik, 600 detik, dan 700 detik adalah seperti Gambar 4.44, 4.45, dan 4.46.

a. Pada saat $t = 500$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	100	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

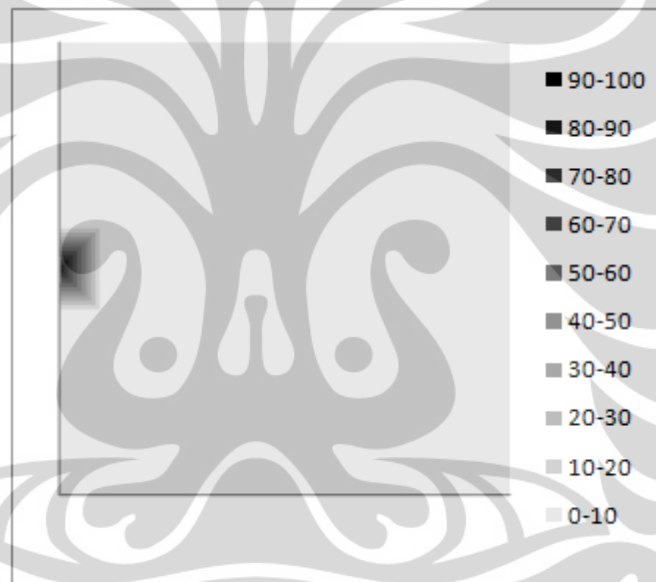
Gambar 4.44. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 3 saat $t = 500$ detik

Sumber: Olahan Penulis

b. Pada saat $t = 600$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	100	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

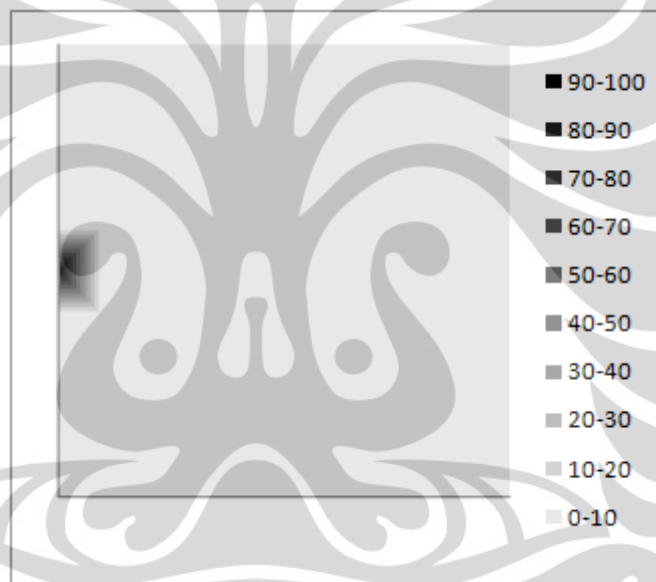
Gambar 4.45(a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran
Pencemar pada Eksperimen 3 saat $t = 600$ detik

Sumber: Olahan Penulis

c. Pada saat $t = 700$ detik

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	100	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)



(b)

Gambar 4.46. (a) Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik (b) Penjalaran Pencemar pada Eksperimen 3 saat $t = 700$ detik

Sumber: Olahan Penulis

Berdasarkan Gambar 4.44, 4.45, dan 4.46 konsentrasi pencemar bergerak sesuai dengan arah kecepatan yang mengarah dari hulu (kiri) ke hilir (kanan). Hal ini menunjukkan pola penjalaran pencemar sesuai dengan teori untuk kondisi Ekperimen 3, yaitu gerak pencemar dipengaruhi oleh adveksi dan dispersi (proses difusi saja).

4.3 Validasi Model

Dari hasil verifikasi yang telah dilakukan di atas, hasil metode numerik Model Transpor Pencemar yang dibuat telah memiliki pola yang sama dengan hasil metode analitik. Tahap selanjutnya ialah validasi model dengan membandingkan hasil metode numerik Model Transpor Pencemar dengan perilaku konsentrasi pencemar yang terjadi pada lapangan. Kondisi lapangan yang akan dilihat perilaku konsentrasinya adalah kondisi pada *seepage tank*.

Data parameter dan variabel yang akan dimasukkan ke dalam model adalah sebagai berikut:

- a. Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 144 meter, lebar 32 meter, nilai $dx = 8$ meter, dan $dz = 8$ meter. Dengan terdapat dinding *impermeable* pada bagian tengah akuifer (lihat Gambar 4.52)
- b. Simulasi dilakukan dengan waktu penuluran selama 50000, 60000, 70000 detik dengan $dt = 100$ detik.
- c. Nilai dispersivitas (α) sebesar 10 m dan koefisien difusi 10^{-9} m²/detik.
- d. Nilai kecepatan sumbu X maupun sumbu Z di masing-masing titik didapat dari hasil aplikasi program GWFM 2012 pada kondisi *steady* dengan data parameter yang disesuaikan.

Langkah pertama dalam mensimulasikan kondisi adalah dengan membuka aplikasi program Model Transpor Pencemar dan memilih sub program *Metode Numerik*. Dengan demikian akan muncul form seperti Gambar 4.47 dan diisi sesuai dengan data parameter dan variabel yang ditelah ditentukan di atas.

Panjang Akuifer	144	m	Waktu Penelusuran	50000	dtk
Lebar Akuifer	32	m	Jarak antar waktu (dt)	100	dtk
Jarak antar titik Sb. X (dx)	8	m	Dispersivitas	10	m
Jarak antar titik Sb. Z (dz)	8	m	Koefisien Difusi	10	m ² /dt

Hapus Semua OK

Gambar 4.47. Tampilan Form Data Parameter dan Variabel pada Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar

Sumber: Olahan Penulis

Setelah menekan tombol *OK* akan tampil grid yang ukurannya sesuai dengan data parameter dan variabel akuifer pada halaman model penyelesaian metode numerik seperti terlihat pada Gambar 4.48.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0																			
1																			
2																			
3																			
4																			

Gambar 4.48. Tampilan Grid pada Simulasi Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar

Sumber: Olahan Penulis

Setelah mendapatkan nilai kecepatan sumbu *X* dan sumbu *Z* pada aplikasi program GWFM 2012, data kecepatan dapat dimasukkan pada model dengan memilih tombol *Input Kecepatan X* dan *Input Kecepatan Z*.

		KECEPATANX																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-9E-05	0,0002	-0,0002	-9E-05	0	0	0	0	0	0	0
1	-1E-06	-2E-06	-5E-06	-9E-06	-1E-05	-2E-05	-4E-05	-6E-05	-8E-05	1E-04	-1E-04	-8E-05	-6E-05	-4E-05	-2E-05	-1E-05	-8E-06	-4E-06	1E-06	0
2	-2E-06	-4E-06	-9E-06	-2E-05	-3E-05	-4E-05	-7E-05	-0,0001	-0,0002	-0,0004	-0,0004	-0,0002	-0,0001	-7E-05	-4E-05	-3E-05	-2E-05	-7E-06	4E-06	0
3	-2E-06	-6E-06	-1E-05	-2E-05	-4E-05	-6E-05	-9E-05	-0,0001	-0,0002	-0,0003	-0,0003	-0,0002	-0,0001	-9E-05	-6E-05	-3E-05	-2E-05	-9E-06	5E-06	0
4	-3E-06	-6E-06	-1E-05	-2E-05	-4E-05	-6E-05	-9E-05	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0001	-9E-05	-6E-05	-4E-05	-2E-05	-9E-06	4E-06	0

Gambar 4.49. Tampilan *Input Kecepatan X* pada Simulasi Validasi

Model Transpor Pencemar

Sumber: Olahan Penulis

		KECEPATANZ																		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
1	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
2	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Gambar 4.50. Tampilan *Input Kecepatan Z* pada Simulasi Validasi

Model Transpor Pencemar

Sumber: Olahan Penulis

Kemudian masukkan nilai konsentrasi yang menjadi *initial guess* dengan menekan tombol *Kondisi Awal dan Kondisi Batas*. Agar kondisi yang disimulasikan menyerupai kondisi lapangan (*seepage tank*), maka dibuat kondisi sebagai berikut:

- Pada semua sel dinding batas dan sel (9,0) sampai (10,2) dibuat *impermeable* (kedap air) dengan nilai konsentrasi nol.
- Pada titik (7,0) dipilih sebagai titik masuk pencemar (*loading*) yang berupa *step loading* dengan nilai konsentrasi 100 mg/L.
- Selain titik di atas, maka nilai konsentrasi dianggap nol (tidak ada konsentrasi pencemar di dalam akuifer sebelum pencemar masuk dengan fungsi *step loading*).

Gambar 4.51. Tampilan Form *Kondisi Awal dan Kondisi Batas* pada Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar

Sumber: Olahan Penulis

Dengan demikian kondisi akuifer sebelum disimulasikan akan menjadi seperti Gambar 4.52.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Gambar 4.52. Tampilan Grid Setelah Diberi Kondisi Awal dan Kondisi batas pada Simulasi Validasi Model Transpor Pencemar

Sumber: Olahan Penulis

Setelah itu untuk melihat nilai konsentrasi pada masing-masing titik pada $t = 50000$ detik, pilih tombol *Jalankan* pada halaman model metode numerik dan menampilkan grafik dengan pilih tombol *Grafik*. Di bawah ini merupakan hasil simulasi untuk validasi model dengan $t = 50000$ detik:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0	0,4	3,3	15	42	100	74	61	0,2	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0,1	0,7	4,6	17	44	79	70	54	0,3	0,3	0,1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0,1	1,1	5,8	18	38	54	55	46	1,6	1,3	0,7	0,3	0,1	0	0	0	0
3	0	0	0,1	1	4,4	12	21	27	29	27	16	8,9	4,2	1,5	0,4	0,1	0	0	0
4	0	0	0	0,1	0,7	2,2	4,7	7,5	9,5	9,8	9,3	8	5,8	3,4	1,4	0,4	0,1	0	0

Gambar 4.53. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Validasi saat $t = 50000$ detik

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 4.54. Penjalaran Pencemar pada Simulasi Validasi saat $t = 50000$ detik

Sumber: Olahan Penulis

Hasil simulasi untuk validasi model dengan $t = 60000$ detik:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0,1	0,9	5,4	19	47	100	78	66	0,4	0,4	0,2	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0,1	1,3	7	22	49	82	74	60	0,5	0,5	0,3	0,1	0	0	0	0	0
2	0	0	0,2	1,8	8,5	23	43	59	61	52	2,3	2	1,2	0,5	0,1	0	0	0	0
3	0	0	0,2	1,8	6,8	16	26	33	35	33	21	12	6,5	2,7	0,8	0,2	0	0	0
4	0	0	0	0,3	1,3	3,5	6,7	10	13	13	13	12	9	5,8	2,9	0,9	0,2	0	0

Gambar 4.55. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Validasi saat $t = 60000$ detik

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 4.56. Penjalaran Pencemar pada Simulasi Validasi saat $t = 60000$ detik

Sumber: Olahan Penulis

Hasil simulasi untuk validasi model dengan $t = 70000$ detik:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
0	0	0	0,2	1,6	7,9	24	52	100	81	71	0,6	0,6	0,3	0,1	0	0	0	0	0
1	0	0	0,3	2,2	9,6	27	54	83	78	64	0,8	0,8	0,5	0,2	0	0	0	0	0
2	0	0	0,4	2,8	11	28	48	63	65	56	3,2	2,8	1,8	0,8	0,3	0,1	0	0	0
3	0	0	0,5	2,9	9,5	20	31	38	41	38	25	16	8,9	4,2	1,5	0,3	0	0	0
4	0	0	0,1	0,5	2	5	8,9	13	16	17	16	15	12	8,6	4,7	1,8	0,4	0	0

Gambar 4.57. Hasil Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Validasi saat $t = 70000$ detik

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 4.58. Penjalaran Pencemar pada Simulasi Validasi saat $t = 70000$ detik

Sumber: Olahan Penulis

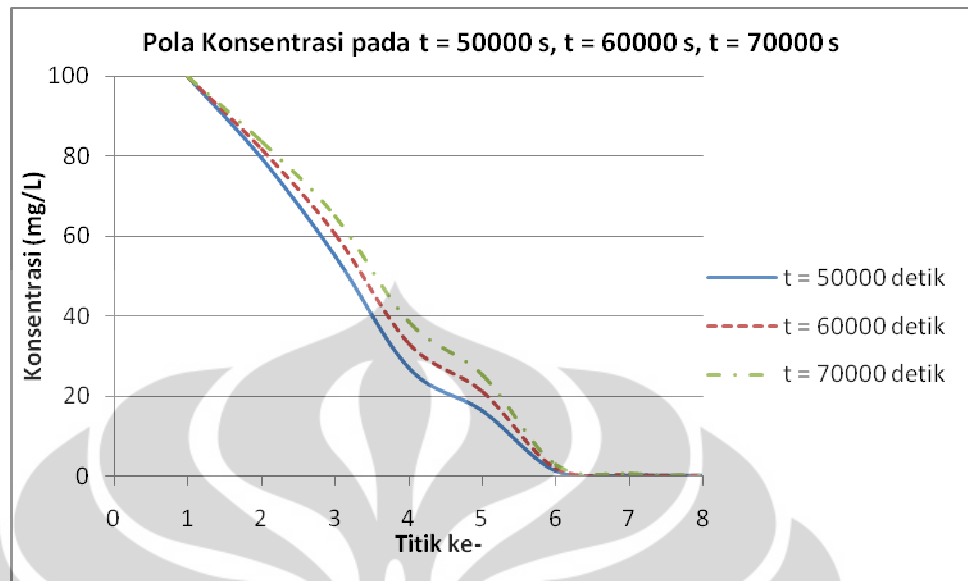
Terlihat pada Gambar 4.56, 4.57, dan 4.58, bahwa konsentrasi pencemar yang berasal dari *loading* akan bergerak menjalar mengikuti arah kecepatan (adveksi) baik pada arah sumbu X maupun sumbu Z. Namun karena nilai koefisien difusi yang dimasukkan adalah 10 (dalam 10^{-10}) $m^2/detik$, nilai konsentrasi yang terjadi pada simulasi ini didominasi oleh *mechanical mixing* yang dipengaruhi oleh nilai dispersivitas dengan kecepatan (sumbu X dan sumbu Z).

Kemudian bila dilihat dari pola konsentrasi, nilai konsentrasi yang terjadi pada simulasi dari masing-masing waktu menunjukkan pola yang sama (Tabel 4.7 dan Gambar 4.59).

Tabel 4.7. Perbandingan Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Validasi untuk $t = 50000$ detik, 60000 detik, dan 70000 detik

Sumber: Olahan Penulis

Titik Koordinat	Titik Ke-	Konsentrasi (mg/L)		
		50000 s	60000 s	70000 s
(7,0)	1	100	100	100
(7,1)	2	79,46	81,67	83,46
(8,2)	3	55,09	60,56	64,89
(9,3)	4	26,81	32,95	38,32
(10,3)	5	16,22	20,96	25,27
(11,2)	6	1,31	2,03	2,80
(12,1)	7	0,13	0,27	0,47
(13,0)	8	0,02	0,05	0,11



Gambar 4.59. Pola Konsentrasi untuk simulasi Validasi pada Model Transpor Pencemar untuk $t = 50000$ detik, 60000 detik, dan 70000 detik

Sumber: Olahan Penulis

Terlihat pada grafik di atas bahwa pola konsentrasi pada simulasi validasi kondisi seepage tank memiliki pola yang sama, yaitu menurun menurut jarak terhadap titik masuknya *loading*. Hal ini menunjukkan bahwa pola konsentrasi sesuai dengan teori, yaitu semakin jauh titik tinjau dari titik masuk *loading* maka semakin menurun nilai konsentrasi yang terjadi.

4.4 Sensitivitas Model

Tahap selanjutnya dari pengembangan sebuah model setelah dilakukan validasi adalah melihat sensitivitas model terhadap variabel yang masuk ke dalam perhitungan. Kondisi yang disimulasikan agar dapat mengetahui sensitivitas model adalah sebagai berikut:

Adapun variabel yang akan dilihat sensitivitasnya terhadap hasil yang dapat dikeluarkan model antara lain:

4.4.1 Sensitivitas Dispersivitas (α)

Untuk mengetahui sensitivitas nilai dispersivitas terhadap perubahan nilai konsentrasi, terlebih dahulu dilakukan perhitungan nilai standar deviasi

dispersivitas yang berasal dari beberapa data hipotetik. Berikut ini adalah data hipotetik dari nilai dispersivitas beserta nilai rata-rata dan standar deviasi:

Tabel 4.8. Data Nilai Dispersivitas

Sumber: Olahan Penulis

No.	Data (m)	Rata-rata (m)	Std. Deviasi (m)
1	10	10,1	0,73
2	9,7		
3	10,5		
4	11,1		
5	9,2		

Berdasarkan tabel di atas, diperoleh nilai dispersivitas yang akan dilihat sensitivitasnya terhadap nilai konsentrasi, yaitu sebesar $10,1 \pm 0,73$ m. Dengan menggunakan nilai tersebut didapat nilai batas atas, tengah, dan bawah untuk dispersivitas adalah 10,83 m, 10,1 m, dan 9,37 m.

Kondisi yang disimulasikan untuk melihat sensitivitas dispersivitas (α) sama dengan kondisi pada Eksperimen 1. Berikut ini adalah data parameter dan variabel:

- Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 20 meter, lebar 20 meter, nilai $dx = 2$ meter dan $dz = 2$ meter. Batas atas dan bawah akuifer merupakan lapisan *impermeable*.
- Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 500 detik dengan $dt = 100$ detik.
- Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 10,83 m, 10,1 m, dan 9,37 m serta koefisien difusi diisi 10^{-9} m²/detik.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,8	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0
5	100	83	65	47	32	20	11	5,7	2,7	1,3	0,9
6	1	1,1	1	0,8	0,5	0,3	0,1	0,1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,7	0,8	0,7	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0
5	100	83	64	46	30	18	9,9	4,9	2,2	1	0,7
6	0,9	1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,6	0,7	0,6	0,5	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0
5	100	82	63	44	28	17	8,7	4,1	1,8	0,8	0,5
6	0,8	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

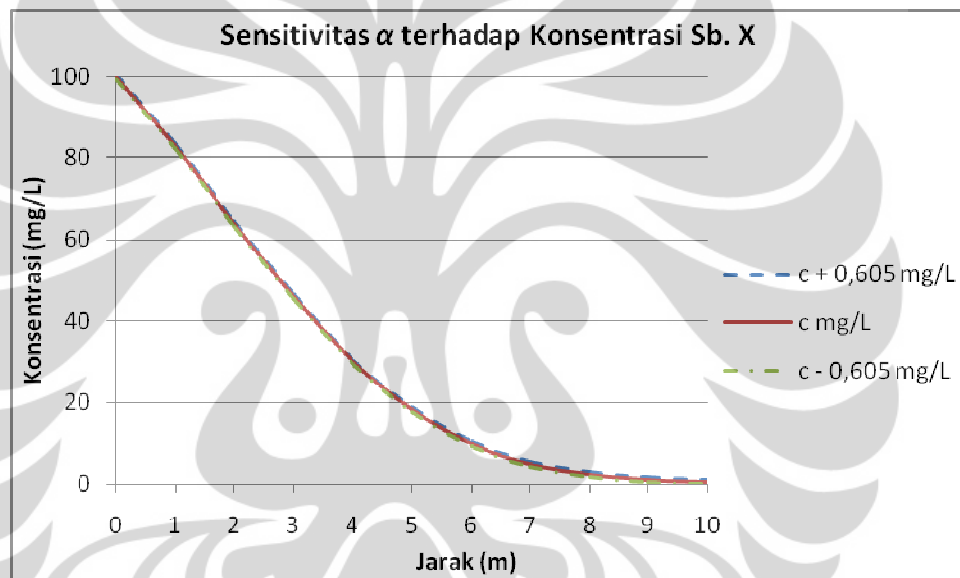
(c)

Gambar 4.60. Nilai Konsentrasi Tiap Titik pada Simulasi Sensitivitas α (a) $\alpha = 10,83$ m, (b) $\alpha = 10,1$ m, dan (c) $\alpha = 9,37$ m

Sumber: Olahan Penulis

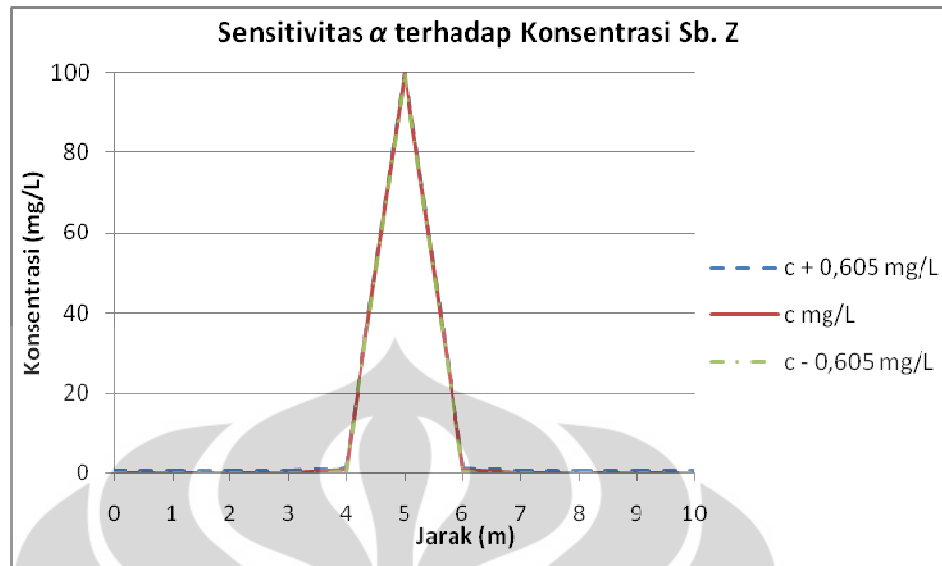
Berdasarkan nilai konsentrasi tersebut, dihitung selisih nilai konsentrasi yang terjadi antara $\alpha = 10,83$ m dengan $\alpha = 9,37$ m. Setelah mendapatkan selisih konsentrasi di setiap sel, dihitung nilai standar deviasi dari konsentrasi akibat perbedaan nilai dispersivitas tersebut. Nilai standar deviasi yang didapatkan dari hasil di atas adalah 0,63 sehingga nilai konsentrasi di tiap sel adalah $c \pm 0,63$ mg/L.

Selanjutnya nilai konsentrasi pada masing-masing titik di baris ke-6 untuk dispersivitas (α) sebesar 10,83 m, 10,1 m dan 9,37 m diplot ke dalam grafik yang sama untuk mengetahui sensitivitas nilai dispersivitas terhadap perubahan nilai konsentrasi.



Gambar 4.61. Sensitivitas α terhadap Konsentrasi pada Sumbu X

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 4.62. Sensitivitas α terhadap Konsentrasi pada Sumbu Z

Sumber: Olahan Penulis

Oleh karena itu, berdasarkan grafik sensitivitas dispersivitas terhadap konsentrasi (Gambar 4.62) terlihat bahwa nilai dispersivitas tidak sensitif terhadap perubahan nilai konsentrasi baik pada sumbu X maupun sumbu Z.

4.4.2 Sensitivitas Koefisien Difusi (D^*)

Untuk mengetahui sensitivitas nilai koefisien difusi (D^*) terhadap perubahan nilai konsentrasi, dilakukan simulasi yang berkondisi sama dengan kondisi pada Eksperimen 1. Berikut ini adalah data parameter dan variabel yang digunakan:

- Akuifer terdiri dari grid yang dibuat dengan panjang 20 meter, lebar 20 meter, nilai $dx = 2$ meter dan $dz = 2$ meter. Batas atas dan bawah akuifer merupakan lapisan *impermeable*.
- Simulasi dilakukan dengan waktu penelusuran (t) selama 500 detik dengan $dt = 10$ detik.
- Pada form data parameter dan variabel, nilai dispersivitas (α) sebesar 10 m serta koefisien difusi (D^*) dengan nilai 10^{-8} m²/detik, 10^{-9} m²/detik, dan 10^{-10} m²/detik.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,7	0,8	0,7	0,6	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0
5	100	83	64	46	30	18	9,8	4,8	2,2	1	0,6
6	0,9	1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,7	0,8	0,7	0,6	0,3	0,2	0,1	0	0	0	0
5	100	83	64	46	30	18	9,8	4,8	2,2	1	0,6
6	0,9	1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,7	0,8	0,7	0,6	0,4	0,2	0,1	0	0	0	0
5	100	83	64	46	30	18	9,7	4,8	2,2	1	0,6
6	0,9	1	0,9	0,7	0,4	0,2	0,1	0,1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

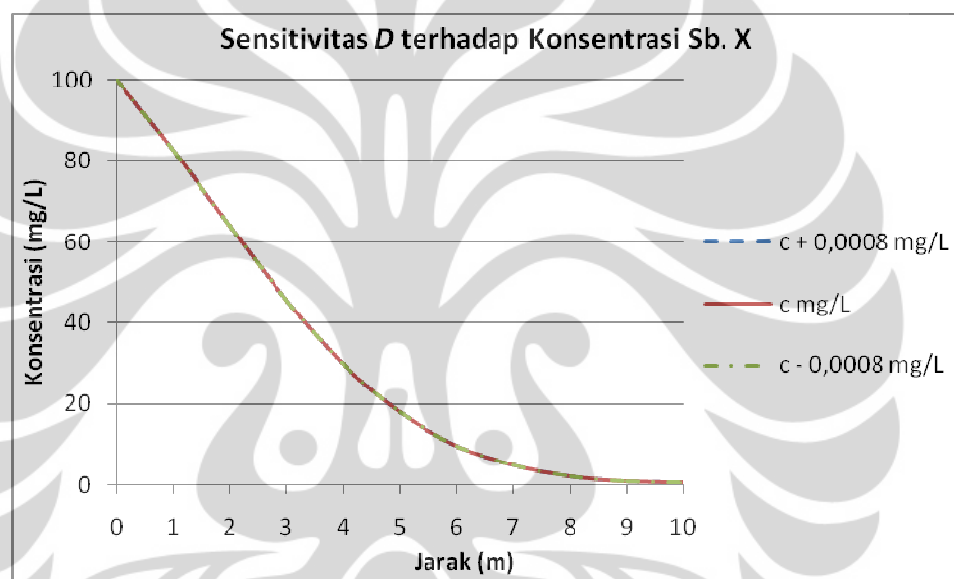
(c)

Gambar 4.63. Nilai Konsentrasi Tiap Titik Simulasi Sensitivitas D (a) $D = 10^{-12}$, (b) $D = 10^{-10}$, dan (c) $D = 10^{-8}$ (dalam $m^2/detik$)

Sumber: Olahan Penulis

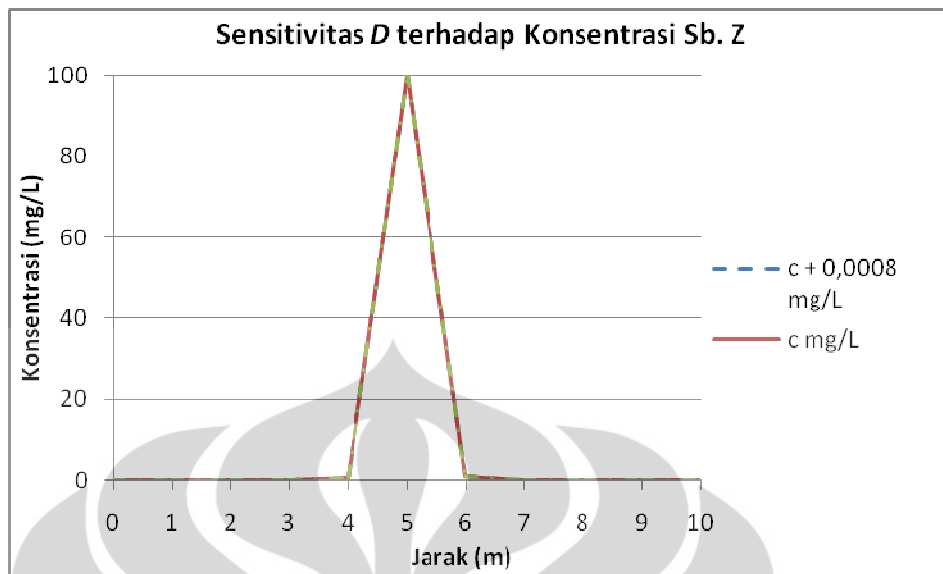
Berdasarkan nilai konsentrasi di atas, dihitung selisih nilai konsentrasi yang terjadi antara D^* dengan nilai 10^{-8} m²/detik dengan 10^{-10} m²/detik. Setelah mendapatkan selisih konsentrasi di setiap sel, dihitung nilai standar deviasi dari konsentrasi akibat perbedaan nilai koefisien difusi. Nilai standar deviasi yang didapatkan dari hasil di atas adalah 0,0008 sehingga nilai konsentrasi di tiap sel adalah $c \pm 0,0008$ mg/L.

Kemudian dibuat grafik yang menunjukkan sensitivitas koefisien difusi dari nilai konsentrasi pada masing-masing titik di baris ke-6 untuk D^* sebesar (D^*) dengan nilai 10^{-8} m²/detik, 10^{-9} m²/detik, dan 10^{-10} m²/detik.



Gambar 4.64. Sensitivitas D terhadap Konsentrasi pada Sumbu X

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 4.65. Sensitivitas D terhadap Konsentrasi pada Sumbu Z

Sumber: Olahan Penulis

Pada Gambar 4.64 dan 4.65 terdapat tiga garis yang menggambarkan nilai konsentrasi batas atas ($c + 0,0008$ mg/L) yang diwakili dengan garis putus-putus, batas tengah (c mg/L) yang diwakili oleh garis solid, dan batas bawah ($c - 0,0008$ mg/L) yang diwakili oleh garis putus-titik (*dash-dot*). Dengan perbedaan nilai koefisien difusi sebanyak dua orde, dari ketiga garis tidak terlihat perbedaan nilai konsentrasi (garis berimpit). Dengan demikian berdasarkan grafik sensitivitas dispersivitas terhadap konsentrasi di atas terlihat bahwa nilai konsentrasi tidak sensitif terhadap perubahan nilai koefisien difusi.

4.5 *Confidence Belt* Nilai Konsentrasi Model Transpor Pencemar untuk Simulasi Eksperimen 1

Menurut Kamus ICID versi Indonesia, *confidence belt* adalah area di antara batas atas dan batas bawah. Tujuan dihitungnya *confidence belt* nilai konsentrasi pada Model Transpor Pencemar ini adalah agar dapat diketahui nilai batas atas dan batas bawah nilai konsentrasi dari hasil simulasi.

Untuk mendapatkan *confidence belt* pada model ditentukan kondisi yang disimulasikan adalah kondisi untuk Eksperimen 1. Kemudian dihitung masing-masing standar deviasi yang terjadi akibat parameter dan variabel yang

mempengaruhi nilai konsentrasi. Sesuai dengan sensitivitas model yang telah dilakukan variabel yang mempengaruhi nilai konsentrasi pada model ini adalah nilai dispersivitas (α) dan koefisien difusi (D^*). Apabila ditulis dalam persamaan, maka *confidence belt* nilai konsentrasi (σc_{cb}) pada model ini adalah sebagai berikut:

$$\sigma c_{cb} = \sqrt{\sigma c_{\alpha}^2 + \sigma c_{D^*}^2} \quad (4.1)$$

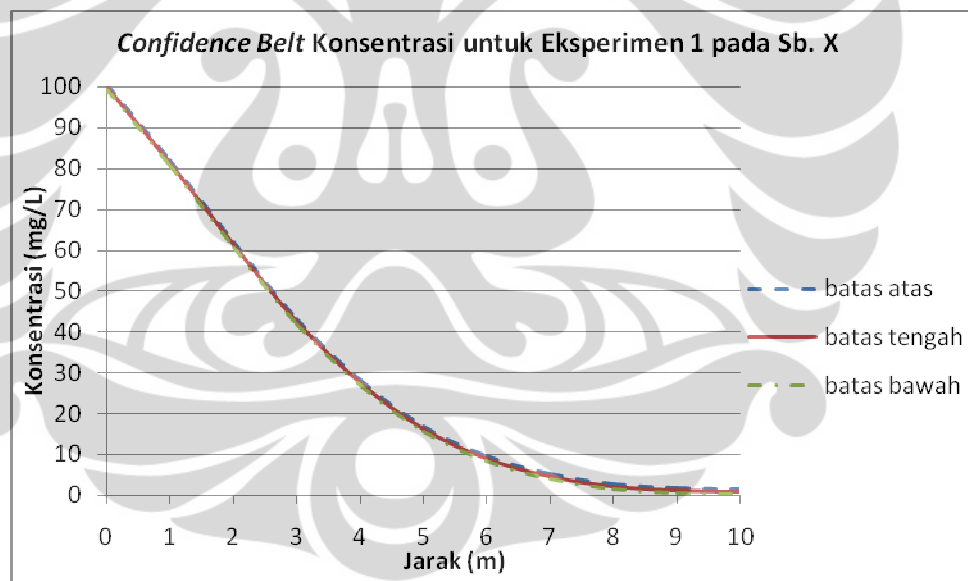
dengan

σc_{α} = standar deviasi konsentrasi akibat perubahan nilai dispersivitas α

σc_{D^*} = standar deviasi konsentrasi akibat perubahan nilai koefisien difusi D^*

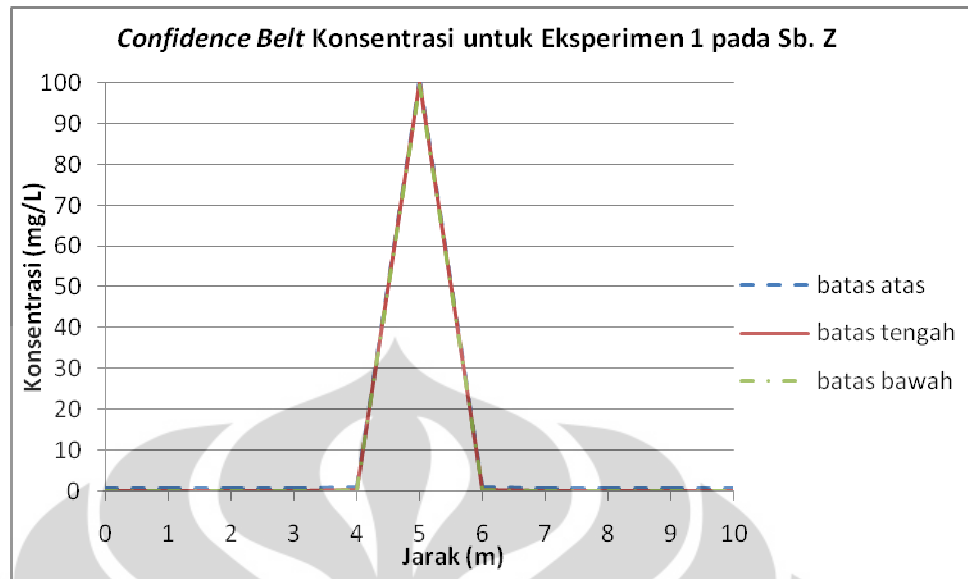
Berdasarkan hasil sensitivitas pada subbab Sensitivitas Model di atas, nilai standar deviasi untuk masing-masing parameter dan variabel berurut dari α dan D^* adalah 0,63 mg/L dan 0,0008 mg/L. Selanjutnya sesuai dengan persamaan di atas, dihitung nilai standar deviasi total adalah sebagai berikut:

$$\sigma c_{cb} = \sqrt{0,605^2 + 0,0008^2} = 0,605 \text{ mg/L} \quad (4.2)$$



Gambar 4.66. *Confidence Belt* Konsentrasi untuk Simulasi Eksperimen 1 pada Sumbu X

Sumber: Olahan Penulis



Gambar 4.67. *Confidence Belt* Konsentrasi untuk Simulasi Eksperimen 1 pada Sumbu Z

Sumber: Olahan Penulis

Dengan demikian nilai standar deviasi yang akan digunakan untuk mendapatkan *confidence belt* pada model ini adalah $\pm 0,63$ mg/L. Kemudian dengan nilai tersebut dibuat grafik yang menggambarkan *confidence belt* nilai konsentrasi model transpor pencemar untuk kondisi simulasi Eksperimen 1 seperti terlihat pada Gambar 4.68 dan 4.69. Terlihat pada grafik untuk sumbu X, deviasi konsentrasi tidak memiliki pengaruh yang cukup besar pada *confidence belt* sehingga nilai konsentrasi pada hasil perhitungan mungkin terjadi adalah $c + 0,63$ mg/L untuk batas atas dan $c - 0,63$ mg/L untuk batas bawah. Namun untuk sumbu Z, deviasi konsentrasi hanya berpengaruh pada batas atas yaitu $c + 0,63$ mg/L. Hal ini dikarenakan nilai konsentrasi pada sumbu Z bernilai mendekati nol (0) sehingga tidak dapat dikurangi dengan nilai deviasi untuk mendapatkan batas bawah pada *confidence belt*. Dengan demikian dapat disimpulkan pada *confidence belt* yang terjadi untuk kondisi Eksperimen 1, bahwa untuk perubahan nilai dispersivitas dan koefisien difusi tidak berpengaruh terhadap nilai konsentrasi yang dihasilkan.

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi tahap verifikasi, eksperimen, validasi, dan sensitivitas model terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan, antara lain:

- a. Pada simulasi verifikasi (baik terhadap jarak maupun waktu), konsentrasi hasil solusi numerik selalu berada di atas nilai konsentrasi hasil analitik.
- b. Pola nilai konsentrasi hasil numerik memiliki pola yang sama dengan hasil metode analitik (baik terhadap jarak maupun waktu).
- c. Pada simulasi verifikasi model terhadap jarak, nilai % *error* semakin besar untuk jarak yang juga semakin membesar (menjauh dari titik *loading*).
- d. Nilai % *error* yang paling besar terjadi pada titik paling jauh dari masuknya *loading*, yaitu sebesar 133,655 %.
- e. Parameter dx yang paling sesuai untuk kondisi satu dimensi adalah $dx = 0,5$ meter.
- f. Parameter dt yang paling sesuai untuk kondisi satu dimensi adalah $dt = 10000$ detik.
- g. Penjalaran konsentrasi pencemar pada Ekperimen 1, 2, dan 3 bergerak sesuai dengan arah kecepatan yang mengarah dari hulu (kiri) ke hilir (kanan).
- h. Pola penjalaran untuk kondisi Ekperimen 1, sesuai dengan teori gerak pencemar yaitu dipengaruhi oleh proses adveksi dan dispersi.
- i. Pola penjalaran pencemar untuk kondisi Ekperimen 2, sesuai dengan teori gerak pencemar yaitu dipengaruhi oleh adveksi dan dispersi (proses *mechanical mixing* saja).
- j. Pola penjalaran pencemar untuk kondisi Ekperimen 3, sesuai dengan teori gerak pencemar yaitu dipengaruhi oleh adveksi dan dispersi (proses difusi saja).
- k. Pada simulasi validasi, konsentrasi pencemar yang berasal dari *loading* bergerak menjalar mengikuti arah kecepatan (adveksi) baik pada arah sumbu X maupun sumbu Z.

- l. Nilai konsentrasi yang terjadi pada simulasi validasi didominasi oleh *mechanical mixing* yang dipengaruhi oleh nilai dispersivitas dengan kecepatan (sumbu X dan sumbu Z).
- m. Pola konsentrasi pada simulasi validasi sesuai dengan teori, yaitu semakin jauh titik tinjau dari titik masuk *loading* maka semakin menurun nilai konsentrasi yang terjadi.
- n. Untuk perubahan nilai dispersivitas dan koefisien difusi tidak berpengaruh terhadap nilai konsentrasi yang dihasilkan baik pada sumbu X maupun sumbu Z.
- o. Nilai standar deviasi yang digunakan untuk mendapatkan *confidence belt* pada untuk Eksperimen 1 adalah $\pm 0,63$ mg/L.
- p. Model Transpor Pencemar dapat memprediksi dinamika konsentrasi pencemar pada aliran air tanah menurut waktu baik secara dua dimensi spasial (dengan perbedaan nilai dx) maupun temporal (dengan perbedaan nilai dt).

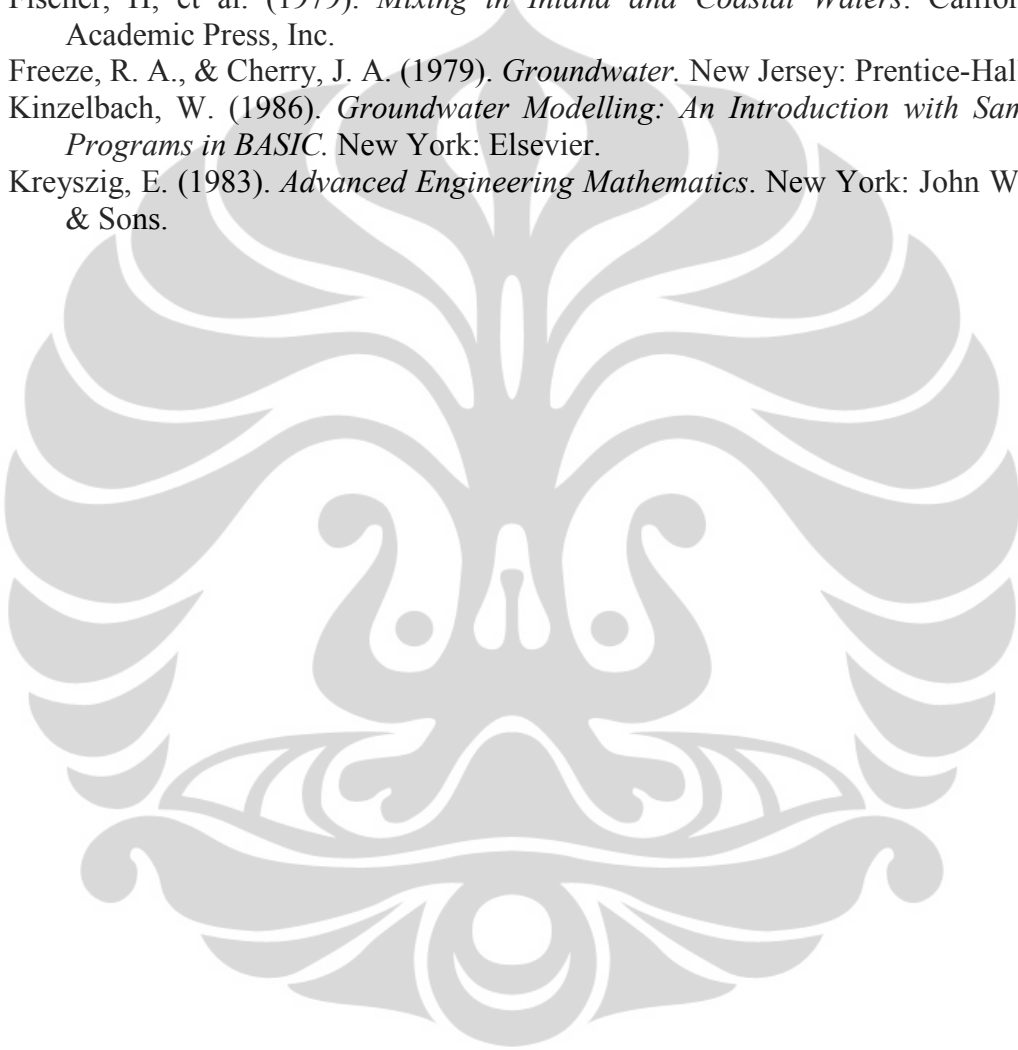
5.2 Saran

Dari program Model Transpor Pencemar yang telah dibuat ini tentunya masih memiliki kekurangan. Agar nilai % *error* yang terjadi semakin kecil dan nilai konsentrasi dapat mendekati nilai aktual, maka model ini perlu dikembangkan lebih lanjut. Khususnya pada penerapan persamaan matematik ke dalam bahasa program *Visual Basic* pada *Microsoft Excel*.

Kemudian agar dapat mensimulasikan lebih banyak kondisi lapangan, kondisi awal dan kondisi batas masih harus dikembangkan lebih jauh. Misalnya saja bila akuifer terdapat lapisan *impermeable* pada arah diagonal.

DAFTAR REFERENSI

- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Dover Publications, Inc.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (1998). *Numerical Methods for Engineers*. Singapore: McGraw-Hill.
- Fischer, H, et al. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. California: Academic Press, Inc.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Kinzelbach, W. (1986). *Groundwater Modelling: An Introduction with Sample Programs in BASIC*. New York: Elsevier.
- Kreyszig, E. (1983). *Advanced Engineering Mathematics*. New York: John Wiley & Sons.



LAMPIRAN – KODE *VISUAL BASIC* PADA *MICROSOFT EXCEL*

MODUL 1

```
Sub UjiMTP()
RK.Show
End Sub
Private Sub Pjg_Change()
Pjg.Value = Me.Pjg.Value
End Sub
Private Sub Lbr_Change()
Lbr.Value = Me.Lbr.Value
End Sub
Private Sub dx_Change()
dx.Value = Me.dx.Value
End Sub
Private Sub dz_Change()
dz.Value = Me.dz.Value
End Sub
Private Sub t_Change()
t.Value = Me.t.Value
End Sub
Private Sub dt_Change()
dt.Value = Me.dt.Value
End Sub
Private Sub Vx_Change()
Vx.Value = Me.Vx.Value
End Sub
Private Sub KDx_Change()
KDx.Value = Me.KDx.Value
End Sub
Private Sub KDz_Change()
KDz.Value = Me.KDz.Value
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

Worksheets("Output").Select
ActiveSheet.range(Cells(2, 2), Cells(2 + nz, 2 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 20
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    With Selection
        .Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
    End With
    With Selection
        .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
    End With

End Sub
```

```
Sub UjiMTP1()
Analitik.Show
End Sub
```

89

```
Sub UjiMTP2()
UbahRK.Show
End Sub
```

```
Sub UjiMTP3()
UbahAnalitik.Show
End Sub
```

```
Sub KAKB()
Kondisi.Show
End Sub
```

```
Sub KecepatanX()
Worksheets("Kecepatan X").Select
End Sub
```

```
Sub KecepatanZ()
Worksheets("Kecepatan Z").Select
End Sub
```

```
Sub Kembali()
Worksheets("Output").Select
End Sub
```

MODUL 2

```
Sub RK1()
Pjg = Worksheets("Hide").range("E4")
Lbr = Worksheets("Hide").range("E5")
dx = Worksheets("Hide").range("E6")
dz = Worksheets("Hide").range("E7")
t = Worksheets("Hide").range("E8")
dt = Worksheets("Hide").range("E9")
ax = Worksheets("Hide").range("E10")
D = Worksheets("Hide").range("E11") * 10 ^ -10

If dx = "" Then
    nx = 0
Else
    nx = Pjg / dx
End If
If dz = "" Then
    nz = 0
Else
    nz = Lbr / dz
End If
For j = 0 To nz Step 1
    For i = 0 To nx Step 1
        x = 3 + i
        y = 6 + j
    KDx = ax * Abs(Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value) + D
```


KDz = ax * Abs(Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value) + D

```

Cells(y, x).Select
With Selection
  If .Interior.ColorIndex = 3 Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
  ElseIf .Interior.ColorIndex = 48 Then
    If Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
      k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
      k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
      k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))
      k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))
      k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k2x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))
      k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))
      k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))
      k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))
      If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
    Then
      Cells(y, x) = Cells(y, x)
    Else
      Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
    End If
  ElseIf (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48) And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
  Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
  Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
  End If
End With

```

```

End If
Elseif Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
    Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
    End If
Elseif Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z *
dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z *
dt))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
    Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
    End If
Elseif Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48
Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x *
dt))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y
- 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k1z * dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x *
dt))))

```

```

k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y,
x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y,
x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))

```

```

k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) + Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) + Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
End If
End If
ElseIf Interior.ColorIndex = 20 Then
If Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))

```

```

k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))

```

```

k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))

```

```

k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))

```

```

k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 3 Or Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 3 Or
Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y - 1,
x).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y, x +
1).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y - 1,
x).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 48 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))

```



```

k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt)))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt)))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt)))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 3
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 3) Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt)))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt)))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt)))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
End If

```

```

End If
End With
Next i
Next j
End Sub

```

```

Sub RK2()
Pjg = Worksheets("Hide").range("E4")
Lbr = Worksheets("Hide").range("E5")
dx = Worksheets("Hide").range("E6")
dz = Worksheets("Hide").range("E7")
t = Worksheets("Hide").range("E8")
dt = Worksheets("Hide").range("E9")
ax = Worksheets("Hide").range("E10")
D = Worksheets("Hide").range("E11") * 10 ^ -10

```

```

If dx = "" Then
nx = 0
Else
nx = Pjg / dx
End If

```

```

If dz = "" Then
nz = 0
Else
nz = Lbr / dz
End If

```

```

For i = 0 To nx Step 1
For j = 0 To nz Step 1
x = 3 + i
y = 6 + j

```

```

KDx = ax * Abs(Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value) + D
KDz = ax * Abs(Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value) + D

```

```

Cells(y, x).Select
With Selection
If .Interior.ColorIndex = 3 Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
ElseIf .Interior.ColorIndex = 48 Then
If Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x *
dt)))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt)))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))))

```

```

If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
  Cells(y, x) = Cells(y, x)
  Else
  Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
  End If
  ElseIf (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48)
And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
  k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
  k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
  k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x *
dt)))))
  k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z *
dt)))))
  k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x *
dt)))))
  k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z *
dt)))))
  k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))
  k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))
  If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
  Cells(y, x) = Cells(y, x)
  Else
  Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
  End If
  ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
  k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
  k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
  k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))
  k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))
  k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))
  k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))
  k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))
  k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))
  If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
  Cells(y, x) = Cells(y, x)
  Else
  Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
  End If
  ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
  k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))

```

```

k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y - 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y - 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))

```

```

k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y,
x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y,
x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))

```

```

k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
End If
ElseIf Interior.ColorIndex = 20 Then
If Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))

```

```

k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Then

```

```

k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y - 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) + Cells(y - 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) + Cells(y - 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y - 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) + Cells(y - 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) + Cells(y - 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))

```



```

k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 3 Or Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 3 Or
Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y - 1,
x).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y, x +
1).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y - 1,
x).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 48 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))

```

```

k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If

```

```

ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 3
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 3) Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
    ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
    Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
    End If
End If
End With
Next j
Next i
End Sub
Sub RK3()
Pjg = Worksheets("Hide").range("E4")
Lbr = Worksheets("Hide").range("E5")
dx = Worksheets("Hide").range("E6")
dz = Worksheets("Hide").range("E7")
t = Worksheets("Hide").range("E8")
dt = Worksheets("Hide").range("E9")
ax = Worksheets("Hide").range("E10")
D = Worksheets("Hide").range("E11") * 10 ^ -10

```

```

If dx = "" Then
    nx = 0
Else
    nx = Pjg / dx
End If

```

```

If dx = "" Then
    nz = 0
Else

```

```

    nz = Lbr / dz
End If

For j = nz To 0 Step -1
    For i = nx To 0 Step -1
        x = 3 + i
        y = 6 + j

KDx = ax * Abs(Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value) + D
KDz = ax * Abs(Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value) + D

Cells(y, x).Select
With Selection
    If .Interior.ColorIndex = 3 Then
        Cells(y, x) = Cells(y, x)
    ElseIf .Interior.ColorIndex = 48 Then
        If Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
            k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
            k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
            k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))
            k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))
            k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))
            k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))
            k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))
            k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))
            If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
            Then
                Cells(y, x) = Cells(y, x)
            Else
                Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt
            End If
        ElseIf (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48)
            And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
                k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
                k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
                k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))
                k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))
                k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))
                k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))
            End If
        End If
    End With
End For
End For

```

```

k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z *
dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z *
dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))

```

```

k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x *
dt))))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x *
dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y,
x) + (0.5 * k1x * dt))))))

```

```

k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y,
x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
End If
ElseIf .Interior.ColorIndex = 20 Then
If Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))

```

```

k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))

```



```

If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x) + Cells(y - 1, x)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)

```

```

Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If

```

```

ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
    ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
    Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
    (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
    Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
    (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
    1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
    (k3x * dt))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
    Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
    k4z) / 6) * dt
    End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 3 Or Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 3 Or
Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y - 1,
x).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y, x +
1).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y - 1,
x).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 48 Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
    ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
    Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
    (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y
    - 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
    + (0.5 * k1z * dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
    Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
    (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) + Cells(y
    - 1, x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
    + (0.5 * k2z * dt))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
    1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
    (k3x * dt))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) + Cells(y - 1,
    x)) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
    (k3z * dt))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
    Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
    k4z) / 6) * dt
    End If

```

```

ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
    ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 3
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 3) Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
    ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
    ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then

```

```

Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
End If
End If
End With
Next i
Next j
End Sub
Sub RK4()
Pjg = Worksheets("Hide").range("E4")
Lbr = Worksheets("Hide").range("E5")
dx = Worksheets("Hide").range("E6")
dz = Worksheets("Hide").range("E7")
t = Worksheets("Hide").range("E8")
dt = Worksheets("Hide").range("E9")
ax = Worksheets("Hide").range("E10")
D = Worksheets("Hide").range("E11") * 10 ^ -10

If dx = "" Then
nx = 0
Else
nx = Pjg / dx
End If

If dz = "" Then
nz = 0
Else
nz = Lbr / dz
End If

For i = nx To 0 Step -1
For j = nz To 0 Step -1
x = 3 + i
y = 6 + j
KDx = ax * Abs(Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value) + D
KDz = ax * Abs(Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value) + D
Cells(y, x).Select
With Selection
If .Interior.ColorIndex = 3 Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
ElseIf .Interior.ColorIndex = 48 Then
If Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x *
dt)))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt)))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))

```

```

k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48)
And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x *
dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z *
dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x *
dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z *
dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If

```

```

ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z *
dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z *
dt))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48
Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
    k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
    k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x *
dt))))
    k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k1z * dt))))
    k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x *
dt))))
    k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k2z * dt))))
    k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
    k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
    If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
    Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48
Then
    k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))

```

```

k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y,
x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y,
x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 48
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))

```



```

k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
End If
ElseIf .Interior.ColorIndex = 20 Then
If Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))

```

```

k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 And Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2
Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else

```

```

Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) + (k3x *
dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - Cells(y, x))))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (2 * (Cells(y, x - 1) - (Cells(y, x) + (k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then

```

```

k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 2 Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - Cells(y, x))))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y - 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 3 Or Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 3 Or
Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y - 1,
x).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex <> 2 Or Cells(y, x +
1).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y - 1,
x).Interior.ColorIndex = 48 Or Cells(y + 1, x).Interior.ColorIndex = 48 Then

```

```

k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y - 1, x))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) + Cells(y
- 1, x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x)
+ (0.5 * k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (Cells(y + 1, x) - (2 * (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) + Cells(y - 1,
x))) - ((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) +
(k3z * dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 48
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 48) Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else

```

```

Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
ElseIf Cells(y - 1, x).Interior.ColorIndex = 2 And (Cells(y, x - 1).Interior.ColorIndex = 3
Or Cells(y, x + 1).Interior.ColorIndex = 3) Then
k1x = ((KDx / (dx ^ 2)) * (Cells(y, x + 1) - (2 * Cells(y, x)) + Cells(y, x - 1))) -
((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - Cells(y, x)))
k1z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))) - ((Worksheets("kecepatan
Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - Cells(y, x)))
k2x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k1x * dt))))
k2z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k1z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k1z * dt))))
k3x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt)))) +
Cells(y, x - 1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) -
(Cells(y, x) + (0.5 * k2x * dt))))
k3z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 * k2z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (0.5 *
k2z * dt))))
k4x = ((KDx / (dx ^ 2)) * ((Cells(y, x + 1) - (2 * (Cells(y, x) + (k3x * dt)))) + Cells(y, x -
1))) - ((Worksheets("kecepatan X").Cells(y, x).Value / dx) * Abs(Cells(y, x + 1) - (Cells(y, x) +
(k3x * dt))))
k4z = ((KDz / (dz ^ 2)) * (2 * (Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z * dt)))) -
((Worksheets("kecepatan Z").Cells(y, x).Value / dz) * Abs(Cells(y + 1, x) - (Cells(y, x) + (k3z *
dt))))
If ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x + k4z) / 6) * dt < 10 ^ -6
Then
Cells(y, x) = Cells(y, x)
Else
Cells(y, x) = Cells(y, x) + ((k1x + k1z + (2 * (k2x + k2z)) + (2 * (k3x + k3z)) + k4x +
k4z) / 6) * dt
End If
End If
End With
Next j
Next i
End Sub
Sub RUNGEKUTTA()

t = Worksheets("Hide").range("E8")
dt = Worksheets("Hide").range("E9")

Count = range("AB3").Value
Do
RK1
RK2
RK3
RK4
Count = Count + (1 * Worksheets("Hide").range("E9").Value)
ActiveSheet.range("AB3") = Count
Loop Until ActiveSheet.range("AB3").Value >= t
End Sub

```

MODUL 3

```

Sub GambarGrafik()
ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select
  Pjg = Worksheets("Hide").range("E4")
  Lbr = Worksheets("Hide").range("E5")
  dx = Worksheets("Hide").range("E6")
  dz = Worksheets("Hide").range("E7")
  t = Worksheets("Hide").range("E8")
  dt = Worksheets("Hide").range("E9")
  KDx = Worksheets("Hide").range("E10")
  KDz = Worksheets("Hide").range("E11")

  If dx = "" Then
    nx = 0
  Else
    nx = Pjg / dx
  End If

  If dz = "" Then
    nz = 0
  Else
    nz = Lbr / dz
  End If

  ActiveChart.SetSourceData Source:=range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx))
  ActiveChart.ChartType = xlSurfaceTopView
  ActiveChart.Elevation = -90
  ActiveChart.Parent.Left = 500
  ActiveChart.Parent.Top = 75
  Min = Application.WorksheetFunction.Min(range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)))
  Max = Application.WorksheetFunction.Max(range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)))
  ActiveChart.Axes(xlValue).MinimumScale = Min
  ActiveChart.Axes(xlValue).MaximumScale = Max
  ActiveChart.Axes(xlValue).MajorUnit = (Max - Min) / 10
  ActiveChart.Axes(xlValue).MinorUnit = (Max - Min) / 20
  ActiveChart.ChartArea.Width = 450
  ActiveChart.Legend.IncludeInLayout = False
End Sub

Sub ResetWaktu()
ActiveSheet.range("AB3").Value = "0"
End Sub

```

MODUL 4

```

Sub MetodeAnalitik()
  Pjg = Worksheets("Hide").range("L4")
  Lbr = Worksheets("Hide").range("L5")
  dx = Worksheets("Hide").range("L6")
  dz = Worksheets("Hide").range("L7")
  t = Worksheets("Hide").range("L8")
  Vx = Worksheets("Hide").range("L9") * 10 ^ -5
  KDx = Worksheets("Hide").range("L10")
  KC = Worksheets("Hide").range("L11")

  If dx = "" Then
    nx = 0

```

```

Else
    nx = Pjg / dx
End If

If dx = "" Then
    nz = 0
Else
    nz = Lbr / dz
End If

For j = 0 To nz Step 1
    For i = 0 To nx Step 1
        x = 3 + i
        y = 6 + j
Cells(y, x).Select
With Selection
If .Interior.ColorIndex = 3 Then
    Cells(y, x) = Cells(y, x)
ElseIf .Interior.ColorIndex = 20 Then
    a = WorksheetFunction.ErfC((dx * i - Vx * t) / Sqr(4 * KDx * t))
    b = WorksheetFunction.ErfC((dx * i + Vx * t) / Sqr(4 * KDx * t))
    c = Exp(Vx * dx * i / KDx)
    Cells(y, x) = KC / 2 * (a + b * c)
End If
End With
Next i
Next j
End Sub

```

USERFORM ANALITIK

```

Private Sub Pjg_Change()
Pjg.Value = Me.Pjg.Value
End Sub
Private Sub Lbr_Change()
Lbr.Value = Me.Lbr.Value
End Sub
Private Sub dx_Change()
dx.Value = Me.dx.Value
End Sub
Private Sub dz_Change()
dz.Value = Me.dz.Value
End Sub
Private Sub t_Change()
t.Value = Me.t.Value
End Sub
Private Sub Vx_Change()
Vx.Value = Me.Vx.Value
End Sub
Private Sub KDx_Change()
KDx.Value = Me.KDx.Value
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

```



```
Worksheets("Hide").range("L4").Value = Pjg.Value
Worksheets("Hide").range("L5").Value = Lbr.Value
Worksheets("Hide").range("L6").Value = dx.Value
Worksheets("Hide").range("L7").Value = dz.Value
Worksheets("Hide").range("L8").Value = t.Value
Worksheets("Hide").range("L9").Value = Vx.Value
Worksheets("Hide").range("L11").Value = KDx.Value
```

```
Worksheets("Analitik").Activate
ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 20
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection
    .Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
    .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
End With
For i = 0 To nx Step 1
Cells(5, 3 + i) = i
Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Next i
For j = 0 To nz Step 1
Cells(6 + j, 2) = j
Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2
Next j
```

```
Unload Me
End Sub
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Pjg.Value = " "
Lbr.Value = " "
dx.Value = " "
dz.Value = " "
t.Value = " "
Vx.Value = " "
KDx.Value = " "
End Sub
```

USERFORM KONDISI

```
Private Sub Pjg_Change()
Pjg.Value = Me.Pjg.Value
End Sub
Private Sub Lbr_Change()
```

```

Lbr.Value = Me.Lbr.Value
End Sub
Private Sub dx_Change()
dx.Value = Me.dx.Value
End Sub
Private Sub dz_Change()
dz.Value = Me.dz.Value
End Sub
Private Sub t_Change()
t.Value = Me.t.Value
End Sub
Private Sub Vx_Change()
Vx.Value = Me.Vx.Value
End Sub
Private Sub KDx_Change()
KDx.Value = Me.KDx.Value
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

Worksheets("Hide").range("L4").Value = Pjg.Value
Worksheets("Hide").range("L5").Value = Lbr.Value
Worksheets("Hide").range("L6").Value = dx.Value
Worksheets("Hide").range("L7").Value = dz.Value
Worksheets("Hide").range("L8").Value = t.Value
Worksheets("Hide").range("L9").Value = Vx.Value
Worksheets("Hide").range("L11").Value = KDx.Value

Worksheets("Analitik").Activate
ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 20
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection
.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
End With
For i = 0 To nx Step 1
Cells(5, 3 + i) = i
Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Next i
For j = 0 To nz Step 1
Cells(6 + j, 2) = j
Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2

```

Next j

Unload Me

End Sub

Private Sub CommandButton1_Click()

Pjg.Value = " "

Lbr.Value = " "

dx.Value = " "

dz.Value = " "

t.Value = " "

Vx.Value = " "

KDx.Value = " "

End Sub

USERFORM RK

Private Sub Pjg_Change()

Pjg.Value = Me.Pjg.Value

End Sub

Private Sub Lbr_Change()

Lbr.Value = Me.Lbr.Value

End Sub

Private Sub dx_Change()

dx.Value = Me.dx.Value

End Sub

Private Sub dz_Change()

dz.Value = Me.dz.Value

End Sub

Private Sub t_Change()

t.Value = Me.t.Value

End Sub

Private Sub dt_Change()

dt.Value = Me.dt.Value

End Sub

Private Sub ax_Change()

ax.Value = Me.ax.Value

End Sub

Private Sub D_Change()

D.Value = Me.D.Value

End Sub

Private Sub output1()

$nx = Pjg.Value / dx.Value$

$nz = Lbr.Value / dz.Value$

Worksheets("Hide").range("E4").Value = Pjg.Value

Worksheets("Hide").range("E5").Value = Lbr.Value

Worksheets("Hide").range("E6").Value = dx.Value

Worksheets("Hide").range("E7").Value = dz.Value

Worksheets("Hide").range("E8").Value = t.Value

Worksheets("Hide").range("E9").Value = dt.Value

Worksheets("Hide").range("E10").Value = ax.Value

Worksheets("Hide").range("E11").Value = D.Value

Worksheets("Output").Activate

```

ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 20
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    With Selection
        .Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
    End With
    With Selection
        .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
    End With
For i = 0 To nx Step 1
Cells(5, 3 + i) = i
Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Next i
For j = 0 To nz Step 1
Cells(6 + j, 2) = j
Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2
Next j

Worksheets("Output").range("Z3").Value = "Waktu"
ActiveSheet.range("AB3").Value = "0"

Unload Me
End Sub
Private Sub velocity1()

```

```

Worksheets("Hide").range("E4").Value = Pjg.Value
Worksheets("Hide").range("E5").Value = Lbr.Value
Worksheets("Hide").range("E6").Value = dx.Value
Worksheets("Hide").range("E7").Value = dz.Value
Worksheets("Hide").range("E8").Value = t.Value
Worksheets("Hide").range("E9").Value = dt.Value
Worksheets("Hide").range("E10").Value = ax.Value
Worksheets("Hide").range("E11").Value = D.Value

```

```

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

```

```

Worksheets("kecepatan X").Activate
ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 37
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    With Selection

```

```

.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
End With
For i = 0 To nx Step 1
Cells(5, 3 + i) = i
Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Next i
For j = 0 To nz Step 1
Cells(6 + j, 2) = j
Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2
Next j

End Sub
Private Sub velocity2()

Worksheets("Hide").range("E4").Value = Pjg.Value
Worksheets("Hide").range("E5").Value = Lbr.Value
Worksheets("Hide").range("E6").Value = dx.Value
Worksheets("Hide").range("E7").Value = dz.Value
Worksheets("Hide").range("E8").Value = t.Value
Worksheets("Hide").range("E9").Value = dt.Value
Worksheets("Hide").range("E10").Value = ax.Value
Worksheets("Hide").range("E11").Value = D.Value

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

Worksheets("kecepatan Z").Activate
ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 37
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection
.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
End With
For i = 0 To nx Step 1
Cells(5, 3 + i) = i

```

```

Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Next i
For j = 0 To nz Step 1
Cells(6 + j, 2) = j
Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2
Next j

```

```

End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()

```

```

velocity1
velocity2
output1

```

```

End Sub
Private Sub CommandButton1_Click()

```

```

Pjg.Value = " "
Lbr.Value = " "
dx.Value = " "
dz.Value = " "
t.Value = " "
dt.Value = " "
ax.Value = " "
D.Value = " "
End Sub

```

FORM UBAH ANALITIK

```

Private Sub UserForm_Initialize()
Pjg.Value = Worksheets("Hide").range("L4").Value
Lbr.Value = Worksheets("Hide").range("L5").Value
dx.Value = Worksheets("Hide").range("L6").Value
dz.Value = Worksheets("Hide").range("L7").Value
t.Value = Worksheets("Hide").range("L8").Value
Vx.Value = Worksheets("Hide").range("L9").Value
KDX.Value = Worksheets("Hide").range("L10").Value

```

```

Pjg.SetFocus

```

```

End Sub

```

```

Private Sub Pjg_Change()

```

```

Pjg.Value = Me.Pjg.Value

```

```

End Sub

```

```

Private Sub Lbr_Change()

```

```

Lbr.Value = Me.Lbr.Value

```

```

End Sub

```

```

Private Sub dx_Change()

```

```

dx.Value = Me.dx.Value

```

```

End Sub

```

```

Private Sub dz_Change()

```

```

dz.Value = Me.dz.Value

```

```

End Sub

```

```

Private Sub t_Change()

```

```

t.Value = Me.t.Value

```

```

End Sub
Private Sub Vx_Change()
Vx.Value = Me.Vx.Value
End Sub
Private Sub K Dx_Change()
K Dx.Value = Me.K Dx.Value
End Sub
Private Sub CommandButton2_Click()

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

Worksheets("Hide").Activate
range("L4").Value = Pjg.Value
range("L5").Value = Lbr.Value
range("L6").Value = dx.Value
range("L7").Value = dz.Value
range("L8").Value = t.Value
range("L9").Value = Vx.Value
range("L10").Value = K Dx.Value

Worksheets("Analitik").Select
ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 20
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection
.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
End With
For i = 0 To nx Step 1
Cells(5, 3 + i) = i
Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Next i
For j = 0 To nz Step 1
Cells(6 + j, 2) = j
Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2
Next j

Unload Me

End Sub

```

USERFORM UBAH RK

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```

Pjg.Value = Worksheets("Hide").range("E4").Value
Lbr.Value = Worksheets("Hide").range("E5").Value
dx.Value = Worksheets("Hide").range("E6").Value
dz.Value = Worksheets("Hide").range("E7").Value
t.Value = Worksheets("Hide").range("E8").Value
dt.Value = Worksheets("Hide").range("E9").Value
ax.Value = Worksheets("Hide").range("E10").Value
D.Value = Worksheets("Hide").range("E11").Value

```

```

Pjg.SetFocus
End Sub
Private Sub Pjg_Change()
Pjg.Value = Me.Pjg.Value
End Sub
Private Sub Lbr_Change()
Lbr.Value = Me.Lbr.Value
End Sub
Private Sub dx_Change()
dx.Value = Me.dx.Value
End Sub
Private Sub dz_Change()
dz.Value = Me.dz.Value
End Sub
Private Sub t_Change()
t.Value = Me.t.Value
End Sub
Private Sub dt_Change()
dt.Value = Me.dt.Value
End Sub
Private Sub ax_Change()
ax.Value = Me.ax.Value
End Sub
Private Sub D_Change()
D.Value = Me.D.Value
End Sub
Private Sub output1()

```

```

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

```

```

Worksheets("Hide").range("E4").Value = Pjg.Value
Worksheets("Hide").range("E5").Value = Lbr.Value
Worksheets("Hide").range("E6").Value = dx.Value
Worksheets("Hide").range("E7").Value = dz.Value
Worksheets("Hide").range("E8").Value = t.Value
Worksheets("Hide").range("E9").Value = dt.Value
Worksheets("Hide").range("E10").Value = ax.Value
Worksheets("Hide").range("E11").Value = D.Value

```

```

Worksheets("Output").Activate
ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 20

```



```

Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection
    .Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
    .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
End With
For i = 0 To nx Step 1
Cells(5, 3 + i) = i
Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
Next i
For j = 0 To nz Step 1
Cells(6 + j, 2) = j
Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2
Next j

Worksheets("Output").range("Z3").Value = "Waktu"
ActiveSheet.range("AB3").Value = "0"
Unload Me
End Sub
Private Sub velocity1()

Worksheets("Hide").range("E4").Value = Pjg.Value
Worksheets("Hide").range("E5").Value = Lbr.Value
Worksheets("Hide").range("E6").Value = dx.Value
Worksheets("Hide").range("E7").Value = dz.Value
Worksheets("Hide").range("E8").Value = t.Value
Worksheets("Hide").range("E9").Value = dt.Value
Worksheets("Hide").range("E10").Value = ax.Value
Worksheets("Hide").range("E11").Value = D.Value

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

Worksheets("kecepatan X").Activate
ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 37
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
With Selection
    .Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
    .Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
End With
With Selection
    .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous

```

```

        .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
    End With
    For i = 0 To nx Step 1
    Cells(5, 3 + i) = i
    Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
    Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
    Next i
    For j = 0 To nz Step 1
    Cells(6 + j, 2) = j
    Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
    Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2
    Next j

End Sub
Private Sub velocity2()

Worksheets("Hide").range("E4").Value = Pjg.Value
Worksheets("Hide").range("E5").Value = Lbr.Value
Worksheets("Hide").range("E6").Value = dx.Value
Worksheets("Hide").range("E7").Value = dz.Value
Worksheets("Hide").range("E8").Value = t.Value
Worksheets("Hide").range("E9").Value = dt.Value
Worksheets("Hide").range("E10").Value = ax.Value
Worksheets("Hide").range("E11").Value = D.Value

nx = Pjg.Value / dx.Value
nz = Lbr.Value / dz.Value

Worksheets("kecepatan Z").Activate
ActiveSheet.Cells.Clear
ActiveSheet.Cells.HorizontalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.Cells.VerticalAlignment = xlCenter
ActiveSheet.range(Cells(6, 3), Cells(6 + nz, 3 + nx)).Select
Selection.Interior.ColorIndex = 37
Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
    With Selection
        .Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlContinuous
    End With
    With Selection
        .Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlContinuous
        .Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlContinuous
    End With
    For i = 0 To nx Step 1
    Cells(5, 3 + i) = i
    Cells(5, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
    Cells(7 + nz, 3 + i).Interior.ColorIndex = 2
    Next i
    For j = 0 To nz Step 1
    Cells(6 + j, 2) = j
    Cells(6 + j, 2).Interior.ColorIndex = 2
    Cells(6 + j, 4 + nx).Interior.ColorIndex = 2
    Next j

```

```
End Sub  
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
velocity1  
velocity2  
output1
```

```
End Sub  
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Pjg.Value = " "  
Lbr.Value = " "  
dx.Value = " "  
dz.Value = " "  
t.Value = " "  
dt.Value = " "  
ax.Value = " "  
D.Value = " "  
End Sub
```

