

# ANALISIS JURNAL

## MODEL HYDRODYNAMIC DARI KOLAM IRIGASI

### ABSTRAK

Studi ini menjelaskan simulasi kolam irigasi dengan model hydrodynamic. Dijelaskan bahwa, second-order-accurate finite-volume technique digunakan penyelesaian dengan governing equation dua dimensi dari kolam irigasi. Persamaan infiltrasi empirik dari Kostiakov-Lewis digunakan untuk menghitung infiltrasi. Model dianjurkan menggunakan data lapangan dan hasil hitungan yang ada di letaratur. Model yang telah diusulkan digunakan untuk mensimulasi saat kolam irigasi pada kondisi lapangan yang tidak teratur dengan ketinggian titik bagian dalam sebagai masukan perhitungan. Hasil kesalahan perhitungan biasanya dapat ditimbulkan akibat menerapkan model sebelumnya untuk penyelesaian hitungan masalah ini. Model yang telah banyak digunakan untuk mempelajari efek dari bentuk kolam pada waktu yang cepat dan mengecek keandalan asumsi aliran satu dimensi pada saat inflow masuk ke saluran is provided only through pada bagian samping. Pada kasus saluran sempit dengan garis aliran sebagian, efek dua dimensional menjadi signifikan apabila ratio lebar aliran dan lebar dasar lebih kecil dari nilai tertentu. Teknik subgrid sederhana dapat dikenalkan untuk mendapatkan penyelesaian grid yang tinggi dekat pada sisi bagian depan dan mengurangi biaya perhitungan.

### PENDAHULUAN

Irigasi permukaan umumnya sering digunakan metode irigasi. Hal ini dikarenakan pembiayaan yang rendah, perawatannya murah dan sedikit menggunakan energi (Walker dan Skogerboe, 1987). Hampir semua metode irigasi permukaan, kolam irigasi merupakan salah satu metoda yang biasa dipakai, umpamanya untuk penanaman padi, dimana ketersediaan air selalu dibutuhkan pada saat musim penanaman. Metode ini mengeleminasi kehilangan air akibat pengaliran dan memberikan control yang lebih baik untuk air irigasi (Clemmens et.al, 1981). Pada kolam irigasi, dilapangan diperlukan ketinggian air permukaan, dan konstruksi jembatan disekitar areanya, pembuatan kolam dengan menggunakan air irigasi yang dipakai. Kolam diisi sesuai kedalaman air yang diinginkan dan air didiamkan selama terjadinya proses infiltrasi ke partikel tanah.

Model matematika untuk irigasi permukaan umumnya diasumsikan pada kondisi aliran satu dimensi. Asumsi ini tingkat validitasnya tinggi apabila hanya untuk irigasi dengan alur dan batas pinggir yang sempit. Aliran pada dua dimensi pada kasus kolam irigasi, dimana air irigasi dapat dipakai disegala penjuru atau untuk sebagian kecil dari luas, dan itu menyebar kesemua bagian. Oleh karena itu, metode irigasi permukaan dua dimensi dapat dipakai untuk pengakurasian dalam perencanaan dan operasi sistem kolam irigasi (Playan et.al, 1994). Bebeapa orang mengembangkan model dua dimensi untuk simulasi aliran-aliran pemecah gelombang, aliran permukaan, dan aliran pada daerah muara (Chow dan Ben-Zvi, 1973; Katopodes dan Strelkoff, 1978; Zhang dan Cundy, 1989; Fennema dan Chauldhry, 1990; Akanbi dan Kaopodes, 1988; Tayfur et.al, 1993; Alcrudo dan Garcia-Navarro, 1993). Walaupun demikian, penggunaan model dua dimensi untuk irigasi permukaan tidak biasa. Baru-baru ini, Playant et.al (1994) mengembangkan model kolam irigasi dengan dua dimensi. Mereka menggunakan variansi skema numeris *the leap-frog* finite-difference untuk mensimulasi persamaan dua dimensi dari air dangkal han hampri sama dengan persamaan

Kostiakov-Lewis untuk infiltrasi. Skema ini membingungkan untuk air dalam dan perhitungan debit dengan *a half-time step*, dan membutuhkan prosedur iterasi untuk menghasilkan debit yang digunakan pada persamaan momentum dari *half-time steps*. Model ini dapat juga digunakan untuk simulasi kolam irigasi dengan perbedaan kondisi aliran dan untuk simulasi irigasi pada kondisi lapangan yang tidak menentu.

Pada pembahasan studi ini, disajikan alternatif penggunaan dua dimensi model kolam irigasi. Model ini didasarkan pada penyelesaian persamaan dua dimensi pada air dangkal untuk aliran permukaan dengan teknik finite volume. Teknik finite volume mempunyai kelebihan (keuntungan) apabila digunakan pada kondisi lapangan yang tidak teratur tanpa membutuhkan penaksiran kondisi batas, tetapi yang dibutuhkan adalah skema finite-difference. Kondisi batas untuk semua tipe, misalnya garis, sudut, atau *fan shape*, dapat dengan mudah dilaksanakan pada metode finite volume. Belakangan ini dikembangkan *essentially non-oscillating (ENO)* skema finite-difference (Nujic, 1995) yang telah memodifikasi dalam kajian studi untuk mengaplikasikan ke dalam finite-volume grid. Juga, model ini diajukan tidak melibatkan solusi iteratif untuk variabel-variabel aliran yang dibutuhkan sebelum model kolam irigasi dikembangkan oleh Playan et.al (1994). Juga, bagian kolam termasuk di dalamnya merupakan persamaan kontinuitas untuk simulasi infiltrasi. Model ini juga diajukan sebagai verifikasi pengukuran data oleh Playan et.al (1994). Model disajikan untuk digunakan mensimulasi kejadian pada kolam irigasi pada kondisi lapangan tak beraturan dengan

## GOVERNING EQUATIONS

Model matematis dari kolam irigasi meliputi penyelesaian dari aliran dua dimensi pada persamaan air dangkal dengan memasukan infiltrasi sebagai bagian dari persamaan kontinuitas. Persamaan ini, yang dijelaskan sebagai hukum konservasi masa dan momentum, dapat ditulis sebagai (Chaudhry, 1993) :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

dimana U, E dan G = vektor, dan didefinisikan sebagai :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + 1/2gh^2 \\ uvh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + 1/2gh^2 \end{bmatrix}, \quad \text{dan } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} -q_s \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

dimana, h = kedalaman aliran (m); u dan v = komponen kecepatan rata-rata pada kedalaman, pada arah x dan y, berurutan (m/s);  $q_s$  = volume laju infiltrasi per unit luas (m.s); g = gravitasi (m/s<sup>2</sup>);  $S_{ox}$  dan  $S_{oy}$  = kemiringan dasar pada arah x dan y; dan  $S_{fx}$  dan  $S_{fy}$  = kemiringan geser pada arah x dan y.

The friction slope dihitung dengan menggunakan persamaan Manning :

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

dimana, n = koefisien kekasaran Manning.

Secara empirik persamaan Kostiakov-Lewis digunakan untuk menghitung laju infiltrasi,  $q_s$  :

$$q_s = \frac{dI}{dt} = ak \tau^{a-1} + f_0 \quad (4)$$

dimana,  $I = k\tau^a + fo\tau$  = infiltrasi kumulatif per unit luas (m); a, k = konstanta empirik dan  $\tau$  = waktu saat masuk, waktu pada awal membasahi sampai pada titik yang ditinjau.

Persamaan (1) dan (4) adalah governing equation untuk kajian studi dari kolam irigasi.  $S_{ox}$  dan  $S_{oy}$  dapat dianggap nol. Walaupun demikian, pengaruh dari mikro topografi pada kolam irigasi dapat dikaji pada pembahasan ini. Catatan bahwa kajian studi disini diasumsikan infiltrasi dan karakteristik kekasaran merata.

## METODE NUMERIK

Governing equation yang diajukan pada seksi sebelumnya merupakan persamaan diferensial partial hiperbolik non linier, yang secara umum dapat diselesaikan dengan menggunakan teknik numeris. Beberapa tipe metode numeris sebagai metode finite difference, finite element dan finite volume yang dapat dipakai untuk menyelesaikan persamaan diferensial partial hiperbolik. Metode finite difference digunakan dalam memperkirakan kondisi batas jika permasalahannya adalah bukan persegi panjang. Mereka menggunakannya dengan sistem grid dengan empat persegi dengan sudut-sudut, lebar yang sama, dan garis paralel. Mereka tidak dapat dengan mudah mensimulasi batas natural, tetapi dapat ditentukan dengan simpel mudah untuk melengkapinya. Pada lain orang, metode finite element mempunyai keunggulan di atas metode finite difference didalam menanganai batas (boundary) yang tidak menentu. Walaupun, mereka dalam perhitungannya lebih intensif dan banyak kesulitannya apabila dibandingkan dengan skema finite difference. Metode finite volume alternatif yang lebih bagus untuk metode finite element dan menjadi populer. Metode finite volume dapat dengan mudah untuk menanganai bentuk tidak persegi dan cukup mudah pula untuk melakukan pekerjaan metode finite difference. Oleh karena itu, pada studi ini metode finite volume digunakan untuk menyelesaikan governing equation di atas. Perkembangan terbaru dengan resolusi tinggi dari skema finite difference (Nujic, 1995) untuk menyelesaikan aliran pemecah pada dam yang dapat di atasi dengan metode finite volume dalam kajian ini. Skema ini hampir dimodifikasi untuk menghitung tingkat infiltrasi di dalam persamaan kontinuitas untuk kolam irigasi. Keuntungan utama dari skema ini adalah sangat simpel dan mudah dalam pelaksanaannya. Itu juga dapat mengatasi kenaikan gradient pada profil permukaan air apabila mereka menginkannya. Aliran pada tipikal sistem irigasi permukaan tidak dapat diisi secara mendadak, dan oleh karena itu *the flux limiting procedure included* pada skema yang diajukan mungkin tidak dapat digunakan. Walaupun, skema Nujic's (1995) diambil pada kajian ini untuk membuat model sangat cakap dan dapat dipakai untuk simulasi aliran permukaan. Prosedur *a flux limiting* kemungkinan dapat digunakan, pada sistem kolam irigasi, apabila bagian permukaan yang kedap air dapat disajikan dalam kolam. Juga, prosedur *a flux limiting* dapat dilakukan yang diajukan oleh Nujic (1995) adalah sangat simpel dan efisien. Skema finite volume yang diajukan adalah skema eksplisit dan dengan akurasi ordo dua pada ruang dan waktu. Itu adalah dua langkah dengan skema *predictor-corrector*. Perkiraan singkat dari skema yang digunakan pada kajian ini disajikan pada teks-teks berikut.

Daerah aliran yang bercabang masuk pada satu set dari sel (i,j), yang masing-masing diidentifikasi oleh hubungannya dengan titik pusat. Grid pada finite volume tidak dibutuhkan secara ortogonal sebagai kasus di dalam grid finite difference. Gambar 1 memperlihatkan element sel-sel (i,j) yang tidak ortogonal dan *its immediate neighbors*. Governing equation yang digabungkan oleh teknik finite volume pada masing-masing sel yang mengkaver seluruh daerah. Persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk integral seperti yang diperlihatkan pada teks di bawah setelah menggunakan teorema Gauss divergence :

$$\int_v \frac{\partial U}{\partial t} dv + \oint_s (F \cdot n) ds = \int_v S dv \quad (5)$$

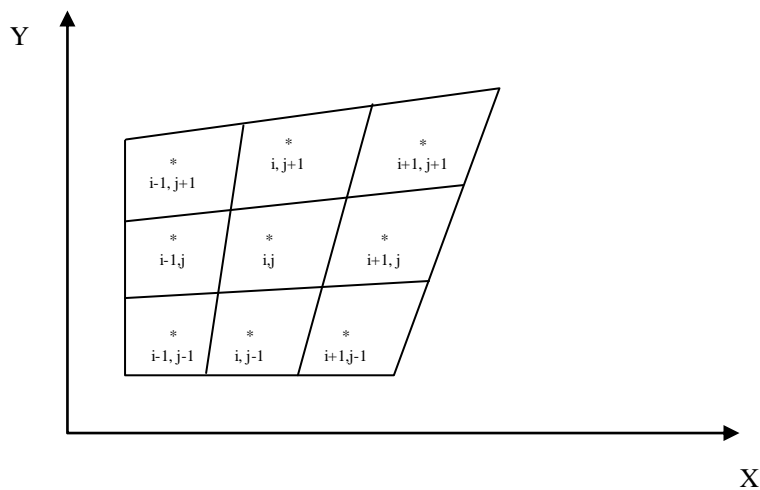
dimana  $F$  = flux term pada permukaan kontrol. Luas integral pada term pertama melambangkan integral dari perubahan waktu sebagai fungsi dari bagian atas luas sel. Integral permukaan pada term ke dua merupakan total akhir flux normal dari batas sel. Unit normal vektor dari dinding sel didefinisikan pada Gambar 2. Skalar produk  $F \cdot n$  pada term kedua (5) dapat diperlihatkan pada term dari komponen Cartesian sebagai :

$$F \cdot n = En_x + Gn_y \quad (6)$$

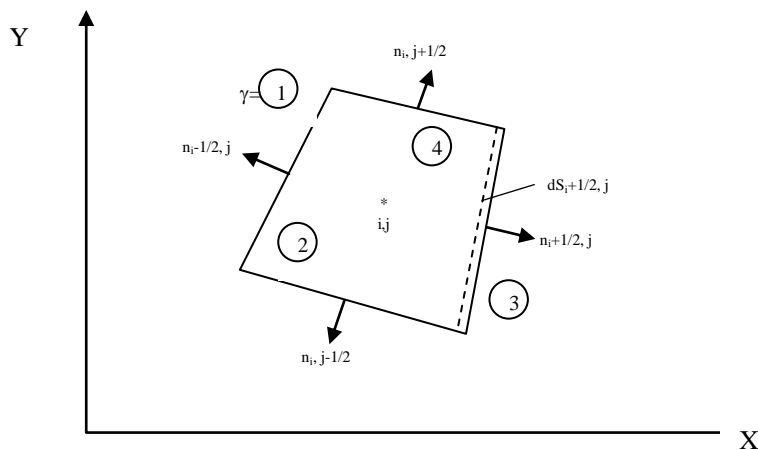
Dimana  $n_x$  dan  $n_y$  = x- dan y- merupakan komponen unit vektor  $n$ , secara berurutan. Pengasumsian dari vektor  $U$  secara umum pada sel, (5) dapat ditulis sebagai :

$$\frac{\partial U}{\partial t} \Delta A + \oint_s (F \cdot n) ds = S \Delta A \quad (7)$$

dimana  $\Delta A$  = luas sel dari finite volume. Integral permukaan pada (7) diperkirakan oleh jumlah diatas empat dinding dari finite volume dalam gambar di bawah :



Gambar 1. Sel dua dimensi untuk setiap perubahan bentuk dari daerah aliran



Gambar 2. Normal vektor dari permukaan sel di dalam grid finite volume sel dua dimensi.

$$\oint_s (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) ds \approx \sum_{i=1}^4 (\mathbf{F}_{i,j} \cdot \mathbf{n}_i) ds, \quad (8)$$

dimana  $ds_i$  = panjang dari empat dinding dari sel kontur  $(i,j)$ ; dan  $\mathbf{F}_{i,j}$  = akhir flux numerik dari muka sel  $r$  yang ada di sel kontur  $(i,j)$ .

Evaluasi dari flux numerik pada muka sel disini dijelaskan untuk muka sel antara titik-titik  $(i+1,j)$  dan  $(i,j)$  (Nujic 1995). Prosedur ini biasanya diambil untuk muka-muka sel :

$$\mathbf{F}_{3,j} \cdot \mathbf{n}_{3,j} = (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n})_{i+(1/2),j} = \frac{1}{2} [F_R + F_L - \alpha (U_R - U_L)] \cdot \mathbf{n}_{i+(1/2),j} \quad (9)$$

dimana  $\alpha$  = koefisien positif;  $F_R = f(U_R)$  = hitungan flux yang digunakan sebagai informasi dari sisi kanan pada bagian muka sel; dan  $F_L = f(U_L)$  hitungan flux yang digunakan sebagai informasi dari sisi kiri pada bagian muka sel,  $U_R$  dan  $U_L$  dihitung dengan menggunakan prosedur di bawah ini :

$$(U_L)_{i+(1/2),j} = U_{i,j} + \frac{1}{2} \delta U_{i,j} \quad (10)$$

$$(U_R)_{i+(1/2),j} = U_{i+1,j} - \frac{1}{2} \delta U_{i+1,j} \quad (11)$$

dimana subkrip  $(i,j)$  = nilai pada setiap titik  $(i,j)$ . Subkrip  $(i + (1/2), j)$  = nilai tengah antara titik  $(i,j)$  dan  $(i+1,j)$ . Beberapa cara untuk menghitung  $\delta U_{i,j}$  dan  $\delta U_{i+1,j}$  digunakan prosedur batas kemiringan (Yee, 1989 ; Alcrudo et al. 1992). Pembatasan "minmod" diikuti dalam studi ini (Yee 1989), aturannya adalah :

$$\delta U_{i,j} = \text{minmod} (U_{i+1,j} - U_{i,j}; U_{i,j} - U_{i-1,j}) \quad (12)$$

$$\delta U_{i+1,j} = \text{minmod} (U_{i+1,j} - U_{i,j}; U_{i+2,j} - U_{i+1,j}) \quad (13)$$

dimana fungsi minmod didefinisikan sebagai

$$\text{minmod} (a, b) = \begin{cases} a & \text{jika } |a| < |b| \text{ dan } ab > 0 \\ b & \text{jika } |b| < |a| \text{ dan } ab > 0 \\ 0 & \text{jika } ab \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

Koefisien positif  $\alpha$  dihitung dengan menggunakan nilai maksimum (untuk semua titik dalam grid) dari nilai eigenvalue terbesar cara matriks Jacobian untuk (1). Pendekatannya diberikan seperti dibawah (Nujic, 1995) :

$$\alpha \geq \max |\lambda_{i,j}| \quad i = 1 \text{ sampai } N_i, j = 1 \text{ sampai } N_j \quad (15)$$

dimana :

$$\lambda_{i,j} = V_{i,j} + \sqrt{gh_{i,j}} \quad (16)$$

$N_i$  dan  $N_j$  = total angka dari grid untuk arah  $x$  dan  $y$ , dan  $V_{i,j}$  = resultan kecepatan. Kondisi  $\alpha$  seperti pada (15) dapat disederhanakan (Nujic, 1995). Nujic (1995) memberikan  $\alpha = 0.4 |\lambda_{\max}|$  untuk kasus aliran satu dimensi,  $\alpha = |\lambda_{\max}|$  dimaksudkan untuk kasus-kasus aliran dua dimensi seperti pada studi ini.

Integrasi dari (7) pada the time domain dapat digunakan pendekatan predictor-corrector, pada diskusi selanjutnya.

### Pendekatan Predictor

Nilai prediksi dari vektor  $U$  pada tingkatan waktu yang tidak diketahui  $t + \Delta t$  dihitung dengan menggunakan aturan dari (7) :

$$U_{i,j}^* = U_{i,j}^* - \frac{\Delta t}{\Delta A_{i,j}} \left[ F_{i+(1/2),j}^n \cdot ds_{i+(1/2),j} + F_{i,j+(1/2)}^n \cdot ds_{i,j+(1/2)} + F_{i-(1/2),j}^n \cdot ds_{i-(1/2),j} + F_{i,j-(1/2)}^n \cdot ds_{i,j-(1/2)} \right] + \Delta t S_{i,j}^n \quad (17)$$

dimana superskrip  $n$  dan  $*$  = nilai dari tingkatan waktu yang diketahui,  $t$  dan nilai prediksi tingkatan waktu yang tidak diketahui,  $t + \Delta t$ .  $\Delta t$  = perbedaan waktu dalam perhitungan (17) yang dapat diinterpretasikan sebagai komponen untuk fektor  $U$ . Persamaan (17) memberikan nilai prediksi dari  $h$ ,  $u$  dan  $v$  pada setiap tingkatan waktu,  $t + \Delta t$  untuk titik manapun  $(i,j)$ .

### Pendekatan Corrector

Apabila vektor  $U$  tidak diketahui untuk tingkatan waktu  $n + 1$  dan pada titik-titik  $(i,j)$  lainnya,  $U_{i,j}^{n+1}$  dihitung dengan menggunakan nilai prediksi dan nilai-nilai untuk setiap tingkatan waktu  $n$ .

$$U_{i,j}^{n+1} = 0.5 \{ U_{i,j}^* + U_{i,j}^* - \frac{\Delta t}{\Delta A_{i,j}} \left[ F_{i+(1/2),j}^* \cdot ds_{i+(1/2),j} + F_{i,j+(1/2)}^* \cdot ds_{i,j+(1/2)} + F_{i-(1/2),j}^* \cdot ds_{i-(1/2),j} + F_{i,j-(1/2)}^* \cdot ds_{i,j-(1/2)} \right] + \Delta t S_{i,j}^* \} \quad (18)$$

Mengikuti yang direkomendasikan Alcrudo et.al (1992),  $U_R^*$  dan  $U_L^*$  (yang diperlukan untuk menghitung  $F^*$ ), dihitung dari  $U_{i+1,j}^*$  dan  $U_{i,j}^*$  yang sama dengan  $\delta U_{i+1,j}$  dan  $\delta U_{i,j}$  yang sudah dihitung dari langkah-langkah prediktor. Prosedur langsung dalam numerical stability lebih baik.

$$(U_L^*)_{i+(1/2),j} = U_{ij}^* + 1/2 \delta U_{i,j} \quad (19)$$

$$(U_R^*)_{i+(1/2),j} = U_{i+1,j}^* + 1/2 \delta U_{i+1,j} \quad (20)$$

Perhitungan  $F^*$  dan  $S^*$  pada (18) dianggap sama untuk perhitungan  $F$  dan  $S$  dalam (17), kecuali apabila nilai prediksi dari  $U$  digunakan sebagai nilai  $U$  pada saat waktu  $t$ .

### Initial Conditions

Initial conditions digunakan pada saat  $t = 0$  untuk memulai perhitungan sementara. Meskipun initial kedalaman aliran adalah sama dengan nol, sangat tipis kedalaman air  $h_{int}$  diasumsikan lebih baik pada  $t = 0$ . Asumsi ini dapat mengatasi numerical singularity pada pengambilan sampel. Hal tersebut dapat dilihat pada (Singh dan Bhallamudi, 1996) bahwa prosedur seperti itu tidak memasukan kesalahan yang signifikan. Komponen kecepatan dan kedalaman infiltrasi adalah nol untuk semua sel pada saat  $t = 0$ .

### Kondisi Batas

Grid pada metode finite-volume dipilih suatu batas-batas dari daerah aliran yang serupa dengan permukaan sel dari sel-sel controle-volume. Kondisi batas ditentukan pada semua bagian luar muka sel dari daerah aliran. Dua tipe dari boundary, batas aliran dan batas bukan aliran, yang dijumpai dalam model kolam irigasi.

### No-Flow Boundary

Skematik yang representatif dari no-flow boundary adalah batas dari dinding solid untuk sel (i,j) seperti terlihat pada gambar 3 (a). Kondisi fluks masa nol dianggap sebagai kondisi batas pada sel bagian kiri (i,j) yang diselesaikan dengan persamaan kontinuitas. Diartikan :

$$(vhn_x + vhn_y)_1 = 0 \quad (21)$$

Nilai dari kedalaman aliran pada muka 1 dimasukan untuk menghitung F pada permukaan tersebut dengan menggunakan persamaan momentum. Pada studi yang diajukan ini, hal tersebut diasumsikan bahwa kedalaman aliran pada muka 1 didekati sama untuk kedalaman aliran pada bagian tengah dari sel. Diartikan :

$$(F.n)_{1(x\text{-momentum})} \approx \frac{1}{2} gh_{i,j}^2 n_{x1} \quad (22)$$

dan

$$(F.n)_{1(y\text{-momentum})} \approx \frac{1}{2} gh_{i,j}^2 n_{y1} \quad (23)$$

Perlu dicatat disini bahwa metode karakteristik adalah hanya penyelesaian koreksi terhadap batas titik-titik dalam skema eksplisit (Cunge et.al 1980). Metode yang digunakan dalam studi ini untuk menghitung variabel dependent bata boundary nodes yang hanya digunakan metode pendekatan.

### Flow Boundary

Batas aliran dijumpai pada semua bagian luar sel yang ada pada air irigasi dari sumber sampai daerah irigasinya. Dua tipe kondisi batas aliran yang diimplementasikan dalam model yang diajukan. Deskripsi dari masing-masing tipe dijelaskan sebagai berikut.

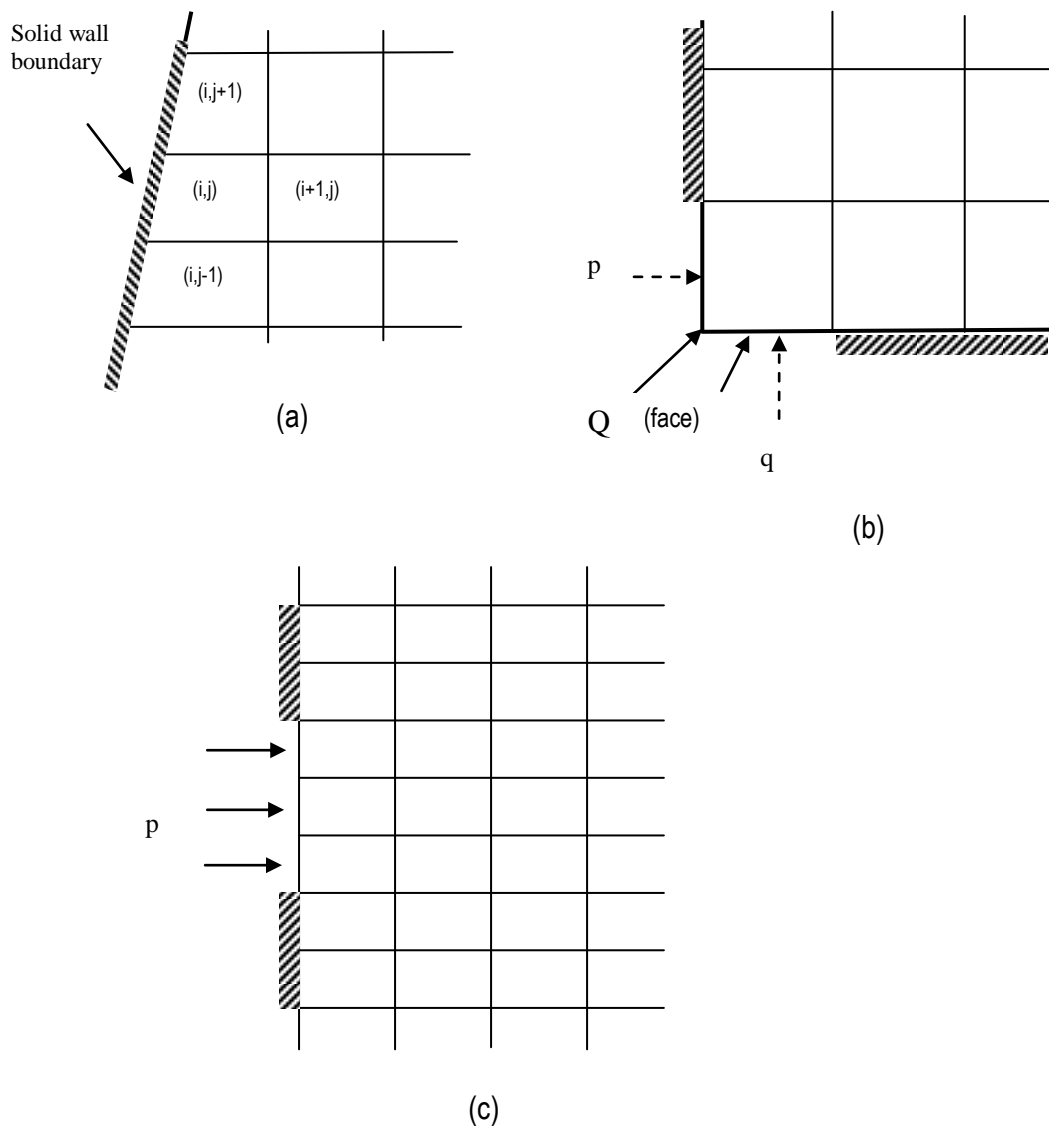
*Corner Inflow* : Corner inflow dapat disamakan dengan daerah banjir yang berasal dari lokasi sumber pada bagian sudut kolam. Diperlihatkan pada gambar 3 (b)., total besarnya banjir disimbolkan untuk inflow, Q (m<sup>3</sup>/s) diasumsikan masuk melalui dua permukaan 1 dan 2 pada jumlah yang sama. Kedalaman aliran pada permukaan dihitung seperti (Playan et.al., 1994a) :

$$h_{face} = \max(h_c, h_{critical}) \quad (24)$$

dimana  $h_c$  = kedalaman aliran pada bagian tengah sel ; dan  $h_{critical}$  = kedalaman aliran yang dihitung dari berdasarkan aliran kritik :

$$h_{critical} = 1.01 \left( \frac{p^2 + q^2}{g} \right)^{1/3} \quad (25)$$

dimana p dan q = unit debit dari muka 1 dan 2 pada gambar 3 (b). Dicatat bahwa kedalaman kritik adalah naik hingga 1% untuk memastikan kondisi aliran subkritik.



Gambar 3. Penjelasan dari kondisi batas : (a) dinding solid ; (b) Inflow dari sudut ; (c) Inflow tegak lurus garis.

*Line inflow* : Line inflow mewakili dari daerah banjir untuk satu muka dari beberapa muka sel. Gambar 3 (c) memperlihatkan garis-garis inflow pada satu sel. Total inflow,  $Q$  ( $m^3/s$ ) diasumsikan masuk melalui hanya dari satu sel. Oleh karena itu unit debit  $p$  ( $m^2/s$ ) untuk masing-masing sel =  $Q/n_t \Delta y$ , yang mana  $n_t$  = jumlah sel inflow. Prosedur untuk menghitung kedalaman aliran pada muka sel dapat dianggap sama dengan prosedur yang telah dijelaskan untuk corner inflow.

### Numerical Stability

Skema yang diajukan untuk finite volume adalah skema eksplisit, dan oleh karena itu perhitungannya dengan setiap waktu tertentu,  $\Delta t$ , perhitungan dibuat untuk setiap waktu tertentu dengan menggunakan kriteria dibawah ini (Alcrudo dan Garcia-Navaro, 1993) :



$$\Delta t \leq \frac{\min [dr(i, j)]}{2 \max [(\sqrt{gh} + \sqrt{u^2 + v^2})_{i,j}]} \quad (26)$$

dimana  $dr(i,j)$  adalah jumlah dari jarak antara setiap titik tengah  $(i,j)$  dan berdekatan dengan empat sel.

Dengan adanya kemajuan sel finite volume, maka volume air yang berinfiltrasi dapat lebih besar dari volume yang disuplai ke dalam sel. Hal ini dianggap sebagai kedalaman aliran negatif pada bagian depan, lebih khusus lagi apabila dilihat dari ukuran sel, dan perubahan waktu,  $\Delta t$  sangat besar. Untuk mengatasi masalah ini, Playan et.al. (1994a) sewaktu-waktu menggunakan lagi kedalaman aliran  $h_{ini}$  menjadi negatif. Prosedur ini dengan memasukan kesalahan keseimbangan masa kemudian untuk memaksakannya dari persamaan kontinuitas. Kesalahan keseimbangan masa ini telah diminimalisasi pada model Playan et.al. (1994a) dengan memasukan kedalaman infiltrasi yang sesuai dan menghitung nilai baru dari intake sementara waktu dan memasukannya sebagai kedalaman infiltrasi yang baru dengan membalikan penyelesaian persamaan Kostiakov-Lewis. Dengan keras dia mengatakan, kejadian bahwa kedalaman aliran negatif dapat diperlihatkan sebagai problem dari resolusi grid didekat rambatan gelombang depan dan dijadikan untuk direduksi dengan ukuran grid. Meskipun demikian Singh dan Bhallamudi (1996) mengambil pendekatan ini sebelum bekerja pada border-strip irrigation, itu membuktikan bahwa perhitungan akan sangat mahal pada kejadian model dua dimensi. Oleh karena itu, prosedur ini dianjurkan oleh Playan et al apabila mengadopsi hal ini.

#### VERIFIKASI DARI MODEL YANG DIAJUKAN

Model yang diajukan telah dibuktikan dengan menggunakan hasil data lapangan oleh Playan et al. (1994a) untuk kolam irigasi. Kedua eksperimen lapangan dari Playan yang digunakan untuk tujuan ini. Dalam eksperimennya di lapangan menggunakan panjang 216,1 m dan lebar 183,2 m dengan luas areal 39.590 m<sup>2</sup>. Itu juga telah diukur untuk kedua arah. Koefisien Manning diambil sama 0,1. Parameter infiltrasi  $k = 3,3066 \times 10^{-3} \text{ m/s}^a$ ;  $a = 0,397$ ; dan  $f_0 = 0,0 \text{ m/s}$ . Lapangan model yang diiri adalah bagian sudut baratdaya dengan debit konstan 0,27 m<sup>3</sup>/s. Inflow dipotong pada waktu tertentu selama 540 menit. Model yang diajukan telah dibuktikan dengan menggunakan data set sebelumnya sekitar 20 ke 20 grid finite volume. Inflow telah dibuktikan dari sel bagian sudut baratdaya. Dihitung secara langsung untuk trayektori selanjutnya dan dibandingkan dengan trayektori dari Playan (1994a) dalam gambar 4 diperlihatkan bahwa perhitungan numerik dihasilkan dengan menggunakan metode angka-angka dari data yang baik dan hasil numerik yang cepat. Pada kenyataannya, numerik menunjukkan hasil yang lebih simpel dari pada hasil numerik dari Playan (1994a). Gambar 5 memperlihatkan konfigurasi penjalaran gelombang pada waktu yang berbeda dihasilkan (1) menggunakan model baru (yang diajukan); (2) eksperimen oleh Playan dan (3) metode numerik dari Playan. Lokasi dari perkembangan bentuk dari 2, 3, 4, 5, 6, dan 8 ditunjukkan oleh gambar 5. Gambar 5 memperlihatkan sajian hasil dari metode numerik untuk konfigurasi penjalaran gelombang dari data lapangan yang cukup baik. Penyesuaian antara sajian hasil numerik dengan data lapangan lebih simpel dari pada perbandingan antara hasil numerik sebelumnya dengan data lapangannya. Pensimulasian secara numerik untuk konfigurasi penjalaran gelombang pada waktu ke  $t = 2$  dan 3 jam sangat cepat membentuk simetris kembali tergantung sudut simetris dari kondisi batasnya. Begitu juga, yang berhubungan dengan muka dari data lapangan akan kelihatan lebih cepat bergerak dalam arah selatan.

Hal ini memungkinkan tergantung sebagian besar dari variabilitas elevasi permukaan tanah (Playan et al. 1996)

Gambar 4. Penjalaran trayektori dari eksperimen lapangan

Gambar 5. Konfigurasi bentuk untuk eksperimen lapangan

Gambar 6. Layout skema dari kondisi irregular

## **SIMULASI NUMERIK**

Beberapa simulasi numerik dimaksudkan untuk (1) memperlihatkan kecocokan model numerik untuk kondisi lapangan yang irregular ; (2) mempelajari efek bentuk lapangan pada perkembangan bentuknya ; (3) mengecek keandalan asumsi aliran satu dimensi pada saat inflow masuk ke kolam sepenuhnya hingga pada bagian dari lebarnya. Hasil dari simulasi numerik dibicarakan pada teks berikut ini.

### **Irregular Fields**

Model yang diajukan dapat digunakan untuk mensimulasi bentuk kolam irigasi pada kondisi lapangan yang irregular dengan titik pandang yang tinggi dari daerah aliran (gambar 6). Kejadian hipotetik yang dipelajari pertama dan dipertimbangkan oleh Playan (1994b) dengan membuat grid persegi 21 baris dan 29 kolom luas masing-masing grid 5 m. Awalnya, dibuat bentuk persegi dengan luas kolam 14.000 m<sup>2</sup>. Porsi bentuk segitiga 1.375 m<sup>2</sup> pada sudut tenggara dan internal high spot 1.750 m<sup>2</sup> dengan mengubah daerah aliran untuk lapangan irregular. Luas bentuk irregular menjadi 10.875 m<sup>2</sup>. Garis aliran dengan debit konstan 0,25 m<sup>3</sup>/s sama yang telah digunakan pada sisi utara untuk durasi waktu 50 menit. Parameter infiltrasi (Playan, 1994b)  $k = 7,0656 \times 10^{-4} \text{ m/s}^a$  ;  $a = 0,388$  ; dan  $f_0 = 9,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ . Simulasi untuk aliran dua dimensi pada profil 15, 30 dan 45 menit diperlihatkan pada gambar 7. Model baru yang diajukan dapat lebih mudah menangani pada kondisi lapangan irregular dengan high spot side dari daerah aliran. Bagian aliran dari arah upstream dari high spot dan bertemu pada dua cabang aliran di daerah downstream dapat dihandel tanpa banyak kesulitan. Model ini pada dasarnya sama dengan teknik finite volume, dan juga disini tidak membutuhkan perkiraan daerah aliran dengan menggunakan grid-grid persegi yang dipakai dalam model finite difference. Secara bertahap-tipe perkiraan dari boundary dalam model finite difference menghasilkan kesalahan yang signifikan (Roacha, 1972) dan akhirnya menunjukkan stabilitas numerik. Dicatat bahwa governing equation untuk irigasi permukaan merupakan tipe hiperbolik, dan banyak menimbulkan kesalahan yang semakin berkembang pada keseluruhan daerah boundary. Kesalahan keseimbangan masa akibat perubahan waktu untuk kasus terdahulu telah dihitung dan dibandingkan dengan hasil dari Playan (1994b) dalam gambar 8. Model baru ini memberikan kesalahan keseimbangan masa lebih kecil dari model yang dikembangkan oleh Playan. Perkiraan ini dikarenakan teknik finite volume lebih baik dari pada teknik finite difference dalam kasus daerah irregular.

(b)

(c)

Gambar 7. Profil overland untuk kolam irigasi pada lapangan irregular :  
(a) 15; (b) 30 dan (c) 45 menit.

Gambar 8. Evaluasi waktu dari kesalahan keseimbangan masa untuk kolam irigasi dalam kondisi irregular.

### **Efek dari Bentuk Lapangan**

Efek dari bentuk lapangan pada perkembangan waktu telah dipelajari untuk kolam irigasi pada lapangan persegi dengan beberapa aspek pertimbangan. Walaupun debit persatuan lebar dianggap konstan untuk simulasi, itu dipakai pada bagian inflow dari sudut. Koefisien Manning yang dipakai,  $n = 0,04$  dan pada setiap tingkat lapangan. Parameter infiltrasi disini (Playan et al, 1994b)  $k = 3,6686 \times 10^{-4} \text{ m/s}^a$ ;  $a = 0,529$ ; dan  $f_0 = 2,2667 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ . Panjang kolam 100 m dan aspek rasio dimodifikasi dengan lebar yang bervariasi dari 10 hingga 100 m. Gambar 9 memperlihatkan penambahan waktu dengan menghasilkan aspek rasio (1) digunakan model baru dan (2) oleh Playan et al. (1994b). Model baru memberikan hasil hampir sama dengan yang dibuat Playan et al. (1994b). Gambar 9 memperlihatkan juga pada setiap penambahan waktu sebagai penambahan aspek rasio, hal ini memperlihatkan efek dua dimensi pada kolam irigasi. Penegasan oleh Playan et al. (1994b), hitungan dibawah perkiraan dari perkembangan waktu yang dapat ditimbulkan oleh model satu dimensi tidak diinginkan dalam penggunaan perencanaan sistem kolam irigasi.

Gambar 9. Efek bentuk lapangan pada penambahan waktu untuk masalah inflow dari sudut.

### **Partial Line Flow**

Model yang diperkenalkan juga digunakan untuk mempelajari efek dari satu inflow partial line hingga selebar dalam lapangan persegi. Inflow yang ke arah batas bidang sering kali dapat dilengkapi hanya dengan bagian dari lebarnya, dan secara obyektif perhitungannya untuk mengecek validitas dari asumsi aliran satu dimensi dalam kasus yang serupa. Karakteristik tanah yang sama disini digunakan dalam kasus inflow dari sudut (SCS 0.6 intake family) dengan digunakan debit konstan  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , dianggap inflow selebar  $b$  pada lokasi ditengah-tengah dari satu sisi. Lebar dari kolam beragam dengan rasio  $b/B$  ( $b$  = lebar aliran,  $B$  = lebar kolam) sekitar 0,047 sampai 0.6. Gambar 10 memperlihatkan variasi waktu dari mulai bergerak sampai berakhir dengan rasio  $b/B$ . Pengurangan pergerakan waktu dianggap sebagai penambahan rasio  $b/B$  dan mencapai nilai asimtotiknya, pada kejadian efek dua dimensi dapat diabaikan untuk rasion  $b/B$  yang besar, yaitu pada saat inflow mencapai semua boundary. Indikasi ini terlihat pada gambar 10, efek dua dimensi tidak signifikan pada rasio  $b/B$  cukup besar dari 0,3 dan model satu dimensi dengan unit debit =  $Q/b$  memberikan hasil yang memuaskan. Bagaimanapun, model dua dimensi dapat diambil untuk  $b/B \leq 0,3$ . Kesimpulan ini diperkuat dengan gambar 11 (a) dan 11 (b), dimana diperlihatkan konfigurasi gelombang depan pada perbedaan waktu untuk  $b/B = 0,047$  dan  $0,1428$ , dan seterusnya.

Gambar 11 memperlihatkan bahwa akhir perambatan gelombang dua dimensi hampir berjalan hingga panjang 85 m pada  $b/B = 0,047$ , hal tersebut dua dimensi berakhir hanya mencapai panjang 30 m pada  $b/B = 0,1427$ .

Gambar 10. Efek bentuk lapangan pada penambahan waktu untuk masalah inflow sepanjang garis

(a)

(b)

Gambar 11. Konfigurasi permukaan untuk partial line inflow ;  
(a)  $b/B = 0,047$  ; (b)  $b/B = 0,1428$

## TEKNIK SUBGRID

Keakuratan dari hasil perhitungan numerik untuk kondisi irigasi permukaan sangat tergantung dari pengambilan ukuran grid di dalam simulasi. Semakin kecil ukuran grid akan dapat mengetahui dengan baik semua posisi yang diperlukan. Mereduksi ukuran grid dengan faktor "n" dalam model eksplisit dua dimensi akan meningkatkan biaya perhitungan dan sebagainya, waktu perhitungannya untuk mengeksekusi kode dengan faktor  $n^3$ . Teknik subgrid yang sederhana telah dijelaskan oleh Singh dan Bhallamudi (1996) untuk melingkup secara baik dari perkembangan bentuk dalam model irigasi border-strip. Itu dapat diperlihatkan bahwa penyimpanan secara signifikan dalam waktu perhitungan dapat dicapai dengan menggunakan teknik ini. Dalam studi ini, sebelum penjelasan teknik subgrid, secara luas untuk penggunaan fine scanning dari perkembangan bentuk dua dimensi akan dijelaskan dalam teks berikut.

Dalam diskusi dibawah ini, subkrip  $i$  dan  $j$  dimaksudkan sebagai nomor sel pada arah  $x$  dan  $y$ . Pada teknik subgrid, digunakan tanda (bendera) untuk lokasi pada datangnya gelombang aliran pada setiap waktu,  $i\text{flag}(j)$  menunjukkan lokasi wavefront pada arah  $x$  untuk semua  $j$ , dan  $j\text{flag}(i)$  menunjukkan lokasi front pada arah  $y$ . Teknik subgrid membagi daerah aliran ke dalam tiga bagian seperti yang diperlihatkan pada gambar 12 (a). Bagian I, daerah yang ditunjukkan lagi dimana gelombang telah datang dan berikutnya dari  $i = 1$  ke  $i\text{flag}(j) - 2$  untuk semua  $j = 1$  ke  $j\text{flag}(i) - 2$ . Bagian I adalah digunakan selama ukuran selnya besar. Bagian II adalah dekat dengan rambatan gelombang dan seterusnya, dari  $i = i\text{flag}(j) - 2$  ke  $i\text{flag}(j) + 1$  pada arah  $x$  dan dari  $j = j\text{flag}(i) - 2$  ke  $j = j\text{flag}(i) + 1$  dalam arah  $y$ . Sel yang ditunjukkan oleh  $i\text{flag}(j) - 2$  dan  $j\text{flag}(i) - 2$  untuk semua  $i$  dan  $j$  seperti pada bagian I dan II. Bagian III adalah bagian sisanya dari daerah aliran dimana penjalaran tidak lagi berjalan. Pergerakan waktu dari variabel dependen  $h$ ,  $u$ ,  $v$  dan  $q_s$  setiap peningkatan waktu  $n$  ke waktu berikutnya  $n + 1$  dalam bagian I adalah dapat digunakan ukuran sel yang besar dan dengan perubahan waktu  $\Delta t_1$  sebagai pembentukan kondisi stabil. Perubahan waktu pada bagian II didasarkan pada ukuran sel yang kecil dan perubahan waktu  $\Delta t_2$  digunakan pada ukuran sel yang lebih kecil. Dihubungkan dengan perubahan waktu tersendiri dalam bagian I, perubahan waktu pada bagian II adalah dipakai waktu  $\Delta t_1/\Delta t_2$  untuk mendapatkan variasi aliran pada tingkatan waktu  $n + 1$  (lihat gambar 12 (b)). Nilai variabel pada bagian III tidak akan berubah kembali sebagai perubahan bentuk yang belum dijangkau pada bagian ini. Perhitungan pertama pada bagian I menggunakan perubahan waktu  $\Delta t_1$  dengan kondisi batas aliran pada aliran sudut. Perhitungan untuk bagian II dimulai setelah perhitungan pada bagian I sudah lengkap, dan diproses dari tingkatan waktu  $t$  ke  $t + \Delta t_1$  pada langkah  $\Delta t_2$ . Kondisi batas aliran untuk bagian II digunakan pada antara ruang bagian I dan bagian II. Nilai yang dihitung dari variabel interface (dari perhitungan bagian I) pada tingkatan waktu  $t$  dan  $t + \Delta t_1$  digunakan untuk perhitungan pada bagian II dengan kondisi batas aliran yang spesifik. Interpolasi linier dengan menggunakan  $t$  dan  $t + \Delta t_1$  diambil untuk memperhitungkan kedudukan aliran pada interface dengan setiap waktu,  $t'$  dan seterusnya,  $t \leq t' \leq t + \Delta t_1$ . Lokasi perambatan bentuk  $i\text{flag}(j)$  dan  $j\text{flag}(i)$  telah dipastikan setiap siklus dari perhitungan untuk perubahan waktu  $\Delta t_1$  dan proses perhitungan dilanjutkan untuk waktu yang lain.

Untuk tujuan ilustrasi, teknik subgrid telah dibuktikan untuk contoh yang terpisah pada tiga kasus kajian (aspek rasio = 1,0) oleh Playan et al. (1994b). Kolam berbentuk bujur sangkat  $100 \times 100$  m. Inflow dari sudut  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  digunakan dari arah sudut barat laut. Parameter infiltrasi dipakai (Playan, 1994b)  $k = 3,668 \times 10^{-4} \text{ m/s}^a$ ;  $a = 0,529$  dan  $f_0 = 2,2667 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ . Koefisien Manning,  $n$  dipakai  $0,04$ . Hasil numerik untuk kasus ini memberikan (1) ukuran grid

sama 5 x 5 m; (2) ukuran grid sama 1,667 x 1,667 m ; dan (3) teknik subgrid dengan ukuran grid lebih besar dari 5 x 5 m dan lebih kecil dari 1.667 x 1.667 m. Luas prosesntase areal yang tertutup oleh aliran permukaan sebagai fungsi dari waktu telah dijalankan dan diplot pada gambar 13. Gambar 13 memperlihatkan hasil kesalahan deskritisasi yang signifikan pada ukuran grid yang lebih besar digunakan penyelesaian dengan governing equation dari metode numerik. Begitu juga, untuk ukuran grid yang kecil dapat dibuktikan dari hasil keakurasian numerik. Walaupun demikian, dengan diperlukan biaya perhitungan untuk menyelesaikannya. Sebagai contoh, kemampuan CPU untuk menjalankan model dengan ukuran grid 1,667 x 1,667 m membutuhkan 2.060 menit (pada HP series 700), dan bagaimana apabila hanya 60 menit dengan ukuran grid 5 x 5 m dapat digunakan. Penerapan dari teknik subgrid membuktikan keakurasian dari simulai numerik dan membutuhkan waktu dan biaya rendah dalam perhitungannya. Hal itu akan dapat diatasi dengan memperhatikan gambar 13 yang dihasilkan dari numerik dengan menggunakan teknik subgrid sangat rapat didapatkan hasil dengan menggunakan ukuran grid yang lebih kecil. Walaupun demikian, biaya perhitungan teknik subgrid hanya 316 menit. Diperlihatkan disini keandalan dan penggunaan dari teknik subgrid.

(a)

(b)

Gambar 12. Penterjemahan sket untuk teknik subgrid



Gambar 13. Penjalaran trayektori untuk pembuktian teknik subgrid

## RESUME DAN KESIMPULAN

Model eksplisit dalam finite volume dua dimensi dapat dikembangkan untuk simulasi kolam irigasi. Model diajukan tidak memerlukan perkiraan dari boundary dengan tipe grid undakan dalam kasus kondisi lapangan yang irregular dengan tinggi internal spots. Oleh karena itu, hal tersebut hasil akurasi lebih sedikit dari pada diandingkan dengan model finite difference. Pada model yang diajukan, kedalaman dan debit perhitungannya tidak membingungkan dan iterasinya tidak memerlukan kecepatan perhitungan. Maka, model yang diajukan dalam perhitungannya lebih efisien dari pada model yang tersedia sekarang ini pada skema leap-frog finite difference. Model ini juga diandalkan menggunakan data lapangan yang tersedia di dalam literatur (Playan et al. 1994a). Penggunaan model ini dapat diperlihatkan pada simulasi kolam irigasi dalam kondisi lapangan irregular dengan high internal spot. Hal tersebut dalam menghasilkan kesalahan pada keseimbangan masa dari penerapan model ini tidak terlalu tinggi. Hampir ditemui efek dua dimensi menjadi signifikan dalam kasus kondisi lapangan persegi apabila inflow berbentuk garis parsial. Efek dua dimensi signifikan pada saat lebar inflow kedalam rasio lebar lapangan lebih kecil dari pada nilai kritiknya. Model satu dimensi mungkin dapat digunakan pada saat lebar aliran kedalam rasio lebar lapangan lebih besar dari nilai tertentu. Teknik subgrid yang sederhana dimaksudkan dalam studi ini untuk meninjau lebih baik penjelasan kedepan dan untuk mengurangi biaya perhitungan.

## NOTASI

Dibawah ini adalah simbol-simbol yang ada dalam makalah :

- a = eksponen numerik Kostiakov
- $C_a$  = angka Courant
- c = kecepatan gelombang
- $ds_r$  = panjang dari empat dinding kontur sel (i,j)
- $F_r$  = numerical flux dari muka sel r bentuk se (i,j)
- $f_0$  = koefisien empirik Kostiakov (m/s)
- g = gravitasi bumi ( $m/s^2$ )
- h = kedalaman aliran (m)
- $h_{ini}$  = kedalaman aliran untuk kondisi initial

$I$  = infiltrasi kumulatif per unit luas (m)  
 $i$ flag,  $j$ flag = lokasi rambatan gelombang pada arah x dan y.  
 $k$  = koefisien numerik Kostiakov ( $m/s^a$ )  
 $N_i, N_j$  = total angka dari titik grid pada arah x dan y.  
 $n$  = koefisien kekasaran Manning  
 $n_x, n_y$  = unit vektor pada arah x dan y.  
 $p, q$  = debit persatuan lebar pada arah x dan y ( $m^2/s$ )  
 $Q$  = debit total ( $m^3/s$ )  
 $q_{ini}$  = debit spesifik sebagai kondisi inisial  
 $q_s$  = laju volume infiltrasi per satuan luas (m/s)  
 $S_{fx}, S_{fy}$  = friction slope pada arah x dan y  
 $S_{ox}, S_{oy}$  = kemiringan bawah pada arah x dan y  
 $t$  = waktu (menit)  
 $U, E, G, S$  = vektor-vektor  
 $V$  = resultan kecepatan (m/s)  
 $u, v$  = komponen rata-rata kecepatan pada arah x dan y  
 $\alpha$  = koefisien positif  
 $\Delta A$  = luas sel finite volume  
 $\Delta t$  = perubahan waktu  
 $\Delta t_1$  = perubahan waktu ukuran grid besar  
 $\Delta t_2$  = perubahan waktu ukuran grid kecil  
 $\tau$  = waktu saat masuk, waktu sejak mulai basah

#### Superscripts

$n, *, **$  = variabel nilai yang diketahui setiap tingkatan waktu, nilai prediksi dan koreksi

#### Subscripts

$i$  = titik grid arah x  
 $j$  = titik grid arah y  
 $r$  = dinding