

**MATRIX FLUX POTENTIAL BEBERAPA JENIS TANAH HOMOGEN
PADA MASALAH INFILTRASI STASIONER DARI
SUATU SALURAN IRIGASI TUNGGAL**

Munadi*

Prodi Pendidikan Matematika FKIP Universitas Pancasakti Tegal
munadi@upstegal.ac.id

Isnani

Prodi Pendidikan Matematika FKIP Universitas Pancasakti Tegal
isnani@upstegal.ac.id

Dian Nataria Oktaviani

Prodi Pendidikan Matematika FKIP Universitas Pancasakti Tegal
dian85nataria@gmail.com

Wikan Budi Utami

Prodi Pendidikan Matematika FKIP Universitas Pancasakti Tegal
wikan.piti@gmail.com

M. Dwi Ariwibowo

Prodi Pendidikan Matematika FKIP Universitas Pancasakti Tegal
mdwiariwibowo18@gmail.com

ABSTRACT. *In this paper, we study the problem of stationary infiltration on several types of homogeneous soil from a single trapezoidal channel. A governing equation in this problem is in the form of a nonlinear differential equation and is called the Richards' equation. The equation can be solved more easily by transforming it into a modified Helmholtz equation. In this study, the Dual Reciprocity Boundary Element Method (DRBEM) was used to solve the modified Helmholtz equation numerically. Then, using the obtained solution, the numerical values of the Matric Flux Potential (MFP) for each soil type were computed and then compared. For the position of the same points, the Pima Clay Loam soil type has the highest MFP value, followed by Clay Loam and Sandy Loam.*

Keywords: *Richards' equation, modified Helmholtz equation, matric flux potential, DRBEM, single irrigation channel.*

ABSTRAK. Dalam artikel ini dibahas masalah infiltrasi stasioner pada beberapa jenis tanah homogen dari saluran irigasi tunggal bentuk trapesium. Persamaan pengatur masalah ini berbentuk persamaan diferensial nonlinear dan disebut dengan persamaan Richards. Persamaan tersebut dapat diselesaikan lebih mudah dengan mentransformasikannya menjadi persamaan Helmholtz termodifikasi. Dalam artikel ini, *Dual Reciprocity Boundary Element Methods* (DRBEM) digunakan untuk menyelesaikan

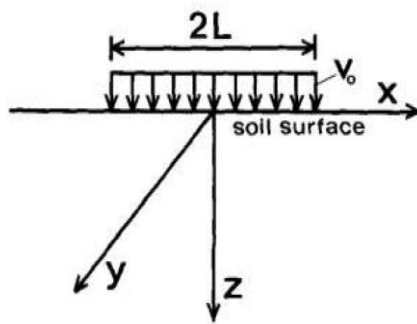
*Penulis Korespondensi

persamaan Helmholtz termodifikasi tersebut secara numerik. Selanjutnya, dihitung nilai numerik *Matric Flux Potential* (MFP) masing-masing jenis tanah dan kemudian dibandingkan. Untuk posisi titik-titik yang sama, jenis tanah *Pima Clay Loam* mempunyai nilai MFP tertinggi, kemudian disusul oleh *Clay Loam* dan *Sandy Loam*.

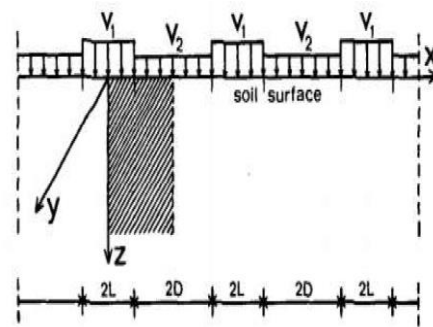
Kata Kunci: persamaan Richards, persamaan Helmholtz termodifikasi, *matric flux potential*, DRBEM, saluran irigasi tunggal.

1. PENDAHULUAN

Istilah saluran tunggal dan saluran periodik dicetuskan oleh Batu (1978). Ilustrasi saluran tunggal dan periodik yang diteliti Batu (1978) dapat dilihat pada Gambar 1 (Batu,1978) dan Gambar 2 (Batu,1978) berikut.



Gambar 1. Geometri saluran tunggal



Gambar 2. Geometri saluran periodik

Dalam penelitian ini, yang dimaksud dengan istilah saluran irigasi tunggal adalah saluran buatan atau sungai, baik sungai besar maupun kecil, yang membelah area pertanian atau perkebunan (Munadi, 2021). Saluran irigasi seperti ini masih banyak dijumpai di desa-desa yang saluran irigasinya belum dimodernisasi/betonisasi. Ilustrasi saluran irigasi tunggal dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Sistem irigasi tunggal (<http://kandangan-bjn-.desa.id/2017/12/pembuatan-saluran-air-untuk-pertanian.html>)

Penelitian tentang masalah infiltrasi pada tanah homogen telah dilakukan oleh beberapa peneliti, di antaranya adalah Aziz dkk (2003), Batu (1976), Clements dkk (2010), Solekhudin (2013), dan Inayah dkk (2021). Aziz dkk meneliti masalah infiltrasi stasioner dari saluran irigasi berkala dengan menggunakan *Boundary Element Methods* (BEM) (2013). Sementara itu, Clement dan Lobo menggunakan BEM untuk meneliti masalah infiltrasi bergantung waktu pada saluran irigasi (2010). Solekhudin (2013) menerapkan *Dual Reciprocity Boundary Element Methods* (DRBEM) pada masalah infiltrasi dari saluran irigasi berkala. Sedangkan Inayah dkk (2021) meneliti tentang hubungan antara nilai penyerapan air dan kadar air beberapa jenis tanah homogen di saluran irigasi periodik.

Aspek penting pada sistem irigasi adalah infiltrasi dan distribusi air dalam tanah. Secara garis besar tanah di alam ini terdiri atas susunan butiran-butiran pasir (*sand*), debu (*silt*), dan lempung (*clay*) dengan persentase berlainan yang akan menentukan tekstur dan klasifikasi tanah. Menurut Pemerintah Kabupaten Tegal (2012), jenis tanah yang terdapat di Kabupaten Tegal antara lain adalah Alluvial (34,93%), Regosol (24 %), Latosol (23,69 %), Grumosol (9,42 %), Andosol (4,29 %) dan jenis lain-lain (3,67 %). Jenis tanah yang akan diteliti infiltrasinya adalah jenis tanah Alluvial, Regosol, dan Latosol yang mendominasi di area pertanian Kabupaten Tegal.

Model matematika infiltrasi air pada saluran irigasi tunggal berupa Persamaan Helmholtz termodifikasi. Pendekatan penyelesaian Persamaan Helmholtz termodifikasi yang digunakan adalah *Dual Reciprocity Boundary Element Methods* (DRBEM). Penjabaran mengenai prosedur penyelesaian model matematika dengan menggunakan DRBEM dapat dilihat di Ang (2007). Tujuan penelitian ini diadakan adalah untuk mengetahui dan membandingkan distribusi kandungan air di dalam tanah Alluvial, Regosol, dan Latosol di sekitar saluran irigasi tunggal bentuk trapesium. Penelitian ini karena belum adanya penelitian tentang infiltrasi air pada beberapa jenis tanah homogen dari saluran irigasi tunggal yang dilakukan oleh para peneliti sebelumnya.

Dalam penelitian ini, distribusi kandungan air digambarkan dengan distribusi nilai-nilai potensial fluks matrik atau *matrik flux potensial* (selanjutnya cukup ditulis MFP). Dalam Lobo (2008), MFP didefinisikan sebagai tenaga penggerak aliran air. Tenaga penggerak aliran air berbanding lurus dengan kandungan air.

Dengan menyelesaikan model matematika yang diperoleh, informasi mengenai pola distribusi air dalam tanah di setiap titik lokasi yang diinginkan dapat diperoleh. Hal ini pada akhirnya dapat bermanfaat untuk menambah khasanah baru dalam bidang komputasi matematika, khususnya yang berkaitan dengan terapan matematika pada masalah infiltrasi dari saluran irigasi tunggal. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan juga dapat memberikan rekomendasi di bidang pertanian sebagai kontribusi matematika bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

2. METODE PENELITIAN

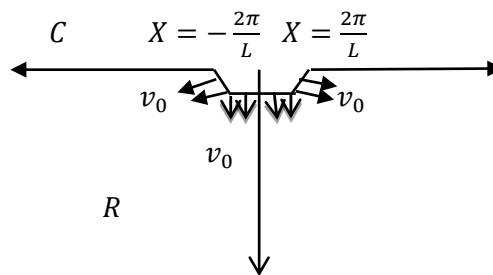
Penelitian ini merupakan penelitian bermodus simulasi yang didasarkan pada studi literatur dan kajian teoretis. Hal ini disebabkan oleh kompleksitas proses aliran di tanah tak jenuh sehingga penelitian ini sulit untuk dilakukan secara eksperimen. Karena selain mahal khususnya dalam hal pengadaan peralatan eksperimen, studi eksperimental perlu banyak waktu dan usaha untuk mengumpulkan data secara teratur.

Adapun langkah-langkah penelitiannya adalah sebagai berikut :

1. Diadakan studi literatur tentang konsep irigasi dan proses infiltrasi suatu saluran irigasi tunggal.
2. Dikonstruksi persamaan pengatur dari masalah infiltrasi stasioner air pada saluran irigasi.
3. Diaplikasikan DRBEM pada penyelesaian persamaan pengatur yang terbentuk.
4. Diterapkan DRBEM pada masalah saluran infiltrasi stasioner dari irigasi tunggal pada beberapa jenis tanah homogen.
5. Diinterpretasikan hasil grafik yang diperoleh.

Sebagai awal penelitian ini, terlebih dahulu akan ditentukan domain dan syarat batas dari masalah infiltrasi air pada saluran irigasi tunggal bentuk trapesium. Dalam menentukan domain dan syarat batas masalah infiltrasi ini, diperlukan asumsi-asumsi berikut, yaitu panjang penampang saluran yang dimasuki fluks (aliran air) adalah $2L$, panjang saluran irigasi diabaikan, saluran irigasi selalu penuh terisi air, tidak ada pengaruh lain seperti daya serap air oleh akar (*root water uptake*) dan tekanan salinitas air irigasi, tidak ada infiltrasi air kecuali dari saluran irigasi, dan besar fluks masuk pada permukaan saluran irigasi diasumsikan bernilai konstan, yaitu v_0 .

Didefinisikan domain masalah infiltrasi stasioner dengan $-\infty < X < \infty$ dan $Z \geq 0$ (sumbu Z positif mengarah ke bawah) yang dinyatakan dengan R dengan batas C seperti pada Gambar 4 berikut ini :



Gambar 4. Geometri saluran tunggal bentuk trapesium

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam studi masalah infiltrasi stasioner, model matematika yang digunakan adalah persamaan diferensial parsial tak linear

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) - \frac{\partial K(\psi)}{\partial Z} = 0, \quad (1)$$

dengan K adalah konduktivitas hidrolis dan ψ adalah potensial hisap. Persamaan (1) disebut persamaan Richard yang menggambarkan pergerakan air di dalam tanah tak jenuh dua dimensi. Selanjutnya, dengan menggunakan transformasi yang diberikan oleh Kirchhoff [14], didefinisikan MFP sebagai

$$\Theta = \int_{-\infty}^{\psi} K(s) ds, \quad (2)$$

dengan K direpresentasikan dalam hubungan eksponensial [7]

$$K(\psi) = K_0 e^{\alpha\psi}, \quad \alpha > 0 \quad (3)$$

dengan α adalah parameter empirik yang menggambarkan tingkat kekasaran tanah dan K_0 adalah konduktivitas hidrolik tanah jenuh. Persamaan (2) dan (3) mentransformasikan persamaan (1) menjadi persamaan berikut

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Z^2} = \alpha \frac{\partial \Theta}{\partial Z}. \quad (4)$$

Dengan menggunakan variabel-variabel tak berdimensi berikut,

$$x = \frac{\alpha}{2} X; \quad z = \frac{\alpha}{2} Z; \quad \Phi = \frac{\pi \Theta}{v_0 L}; \quad u = \frac{2\pi}{v_0 \alpha L} U; \quad v = \frac{2\pi}{v_0 \alpha L} V; \quad f = \frac{2\pi}{v_0 \alpha L} F, \quad (5)$$

dan menerapkan transformasi

$$\Phi = \phi e^z, \quad (6)$$

pada persamaan (4), diperoleh persamaan diferensial parsial linear berikut,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \phi. \quad (7)$$

Persamaan (7) disebut sebagai persamaan Helmholtz termodifikasi.

Akibatnya, diperoleh syarat batas Gambar 4 berikut,

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{2\pi}{\alpha L} e^{-z} + n_2 \phi, \text{ pada bagian penampang saluran,} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\phi, \text{ pada permukaan tanah di luar saluran,} \quad (9)$$

$$\phi = 0; \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad x = -\infty \text{ dan } z \geq 0, \quad (10)$$

$$\phi = 0; \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad x = \infty \text{ dan } z \geq 0, \quad (11)$$

dan

$$\phi = 0; \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0, \quad z = \infty \text{ dan } -\infty \leq x \leq \infty, \quad (12)$$

dengan

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi}{\partial x} n_x + \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z$$

adalah derivatif normal dari ϕ .

Dalam Ang [2], dengan menggunakan DRBEM yang prosesnya memerlukan solusi fundamental persamaan Laplace untuk menyelesaikan Persamaan (7), diperoleh

$$\lambda(\xi, \eta)\phi(\xi, \eta) =$$

$$\int_C \left\{ \phi(x, z) \frac{\partial}{\partial n} [\varphi(x, z; \xi, \eta)] - \varphi(x, z; \xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} [\phi(x, z)] \right\} ds(x, z) + \iint_R \varphi(x, z; \xi, \eta) \phi(x, z) dx dz \quad (13)$$

dengan

$$\lambda(\xi, \eta) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \text{jika } (\xi, \eta) \text{ terletak pada bagian } \textit{smooth} \ C \\ 1, & \text{jika } (\xi, \eta) \in R \end{cases} \quad (14)$$

dan

$$\varphi(x, z; \xi, \eta) = \frac{1}{4\pi} \ln((x - \xi)^2 + (z - \eta)^2). \quad (15)$$

Persamaan (10) adalah solusi fundamental persamaan Laplace.

Persamaan (13) diselesaikan dengan menggunakan DRBEM karena tidak dapat dipecahkan secara analitik. Untuk menerapkan DRBEM, domain harus dibatasi oleh suatu kurva tertutup sederhana. Karena itu, batas-batas yang dipaksakan (*imposed boundary*) akan diberlakukan untuk menggantikan $-\infty \leq x \leq \infty$ dan $z = \infty$ masing-masing menjadi $-b \leq x \leq b$ dan $z = c$. Dalam penelitian ini, dipilih nilai b dan c masing-masing adalah 10.

DRBEM diuji pada kasus infiltrasi air di saluran irigasi tunggal bentuk trapesium pada beberapa jenis tanah yang dominan di Kabupaten Tegal, yaitu Alluvial (34,93 %), Regosol (24 %), dan Latosol (23,69 %). *Clay Loam* merupakan tekstur tanah yang mewakili ordo tanah Alluvial, *Sandy Loam* merupakan tekstur tanah ordo Regosol, dan *Pima Clay Loam* merupakan tekstur tanah yang mewakili ordo Latosol. Setiap jenis tanah memiliki nilai parameter tingkat kekasaran α berbeda-beda. Nilai parameter α pada beberapa jenis tanah diperoleh dari Amoozegar (1984). Berikut diberikan Tabel 1 yang menunjukkan nilai α pada tiap tekstur tanah.

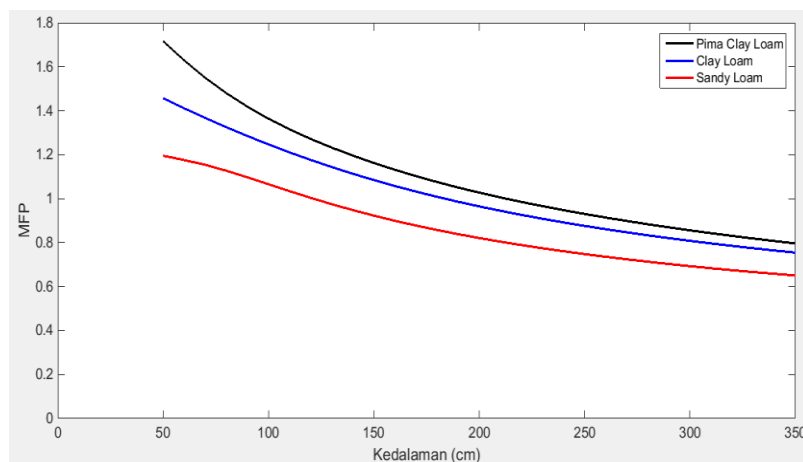
Tabel 1 Tekstur tanah yang diteliti di Kabupaten Tegal

No	Tekstur tanah	α (cm ⁻¹)
1	<i>Clay Loam</i>	$1,9 \cdot 10^{-2}$
2	<i>Sandy Loam</i>	$2,5 \cdot 10^{-2}$
3	<i>Pima Clay Loam</i>	$1,4 \cdot 10^{-2}$

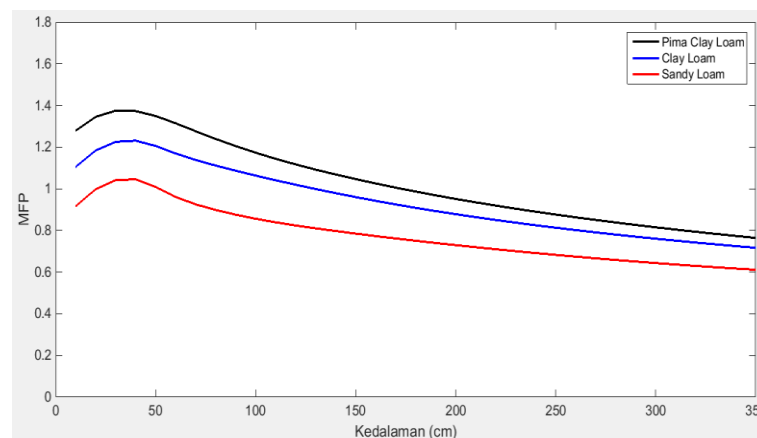
Dengan menggunakan nilai-nilai numerik ϕ yang telah diperoleh dari Persamaan (13), akan ditentukan nilai MFP tak berdimensi Φ dengan menggunakan rumus $\Phi = \phi e^z$. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa bentuk saluran irigasi dalam penelitian ini adalah trapesium. Ditentukan panjang penampang melintang dari saluran irigasi adalah $2L = 200$ cm, lebar saluran adalah $\frac{400}{\pi}$ cm dan kedalaman maksimum saluran adalah $\frac{150}{\pi}$ cm.

Untuk setiap jenis tanah, jumlah ruas garis diskretisasi ditetapkan $N = 800$. Sedangkan jumlah titik kolokasi interior (M) ditetapkan 625, 624, dan 624 berturut-turut untuk penelitian pada tekstur tanah *Pima Clay Loam*, *Clay Loam*, dan *Sandy Loam*. Perbedaan kecil dalam nilai M muncul akibat perbedaan nilai tingkat kekasaran tanah.

Berikut ini akan dibahas tentang distribusi nilai MFP tak berdimensi pada setiap jenis tanah di titik-titik yang ditentukan. Penentuan titik-titik tersebut dengan mengambil arah vertikal dan horisontal. Variasi nilai MFP tak berdimensi terhadap kedalaman (Z) dapat dilihat pada Gambar 5-Gambar 7.

**Gambar 5.** Distribusi nilai MFP saluran irigasi tunggal di sepanjang $X = 30$ cm

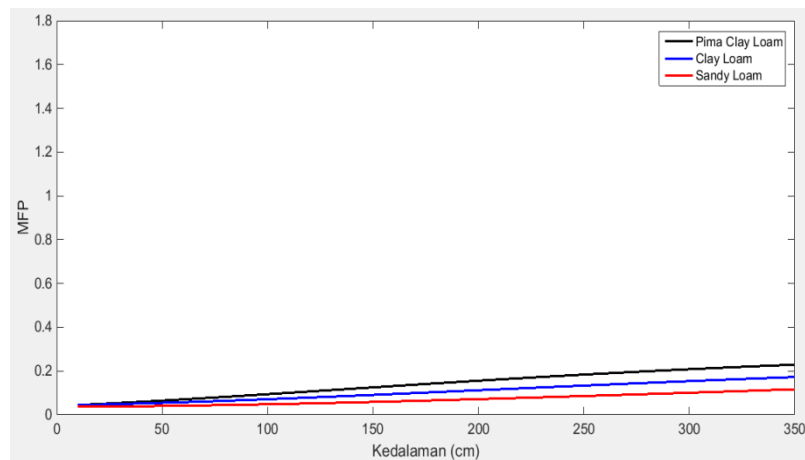
Dari Gambar 5, untuk $X = 30$ cm yang merupakan titik-titik di bawah dasar saluran, nilai MFP setiap jenis tanah berkurang seiring bertambahnya kedalaman tanah. Ini menunjukkan bahwa kandungan air pada tingkat tanah yang dangkal lebih tinggi daripada bagian yang lebih dalam. Tampak pada gambar bahwa titik awal perhitungan nilai MFP tak berdimensi dimulai dari kedalaman $Z = 50$ cm. Hal ini dikarenakan kedalaman dasar saluran yang mencapai $\frac{150}{\pi}$ cm. Tampak pada gambar bahwa urutan tertinggi sampai terendah berturut-turut adalah nilai MFP tak berdimensi tekstur tanah *Pima Clay Loam*, *Clay Loam*, dan *Sandy Loam*. Hal ini mengindikasikan bahwa di sepanjang $X = 30$ cm kandungan air tekstur tanah *Pima Clay Loam* paling tinggi di antara kedua tekstur tanah lainnya.



Gambar 6. Distribusi nilai MFP saluran irigasi tunggal di sepanjang $X = 65$ cm

Gambar 6 memperlihatkan distribusi nilai MFP tak berdimensi di sepanjang garis $X = 65$ cm, yakni titik-titik yang sangat dekat saluran irigasi. Mula-mula nilai MFP tak berdimensi naik seiring bertambahnya sampai kedalaman sekitar 30 cm hingga kemudian nilainya akan menurun. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kandungan air dari titik-titik dekat permukaan tanah sampai kedalaman sekitar 30 cm mengalami peningkatan. Fenomena ini terjadi karena diasumsikan bahwa tidak ada fluks air yang masuk melalui permukaan tanah di luar saluran. Jadi awalnya permukaan tanah di luar saluran diasumsikan kering. Kemudian sampai kedalaman sekitar 30 cm, kandungan air meningkat karena adanya infiltrasi air dari saluran. Dari kedalaman sekitar 30 cm tersebut,

kandungan air selanjutnya terus berkurang seiring bertambahnya kedalaman titik-titik dalam tanah. Seperti pada fenomena distribusi nilai MFP saluran irigasi tunggal di sepanjang $X = 30$ cm, tampak pada gambar bahwa urutan tertinggi sampai terendah berturut-turut adalah nilai MFP tak berdimensi tekstur tanah *Pima Clay Loam*, *Clay Loam*, dan *Sandy Loam*. Hal ini mengindikasikan bahwa di sepanjang $X = 65$ cm kandungan air tekstur tanah *Pima Clay Loam* paling tinggi di antara kedua tekstur tanah lainnya.

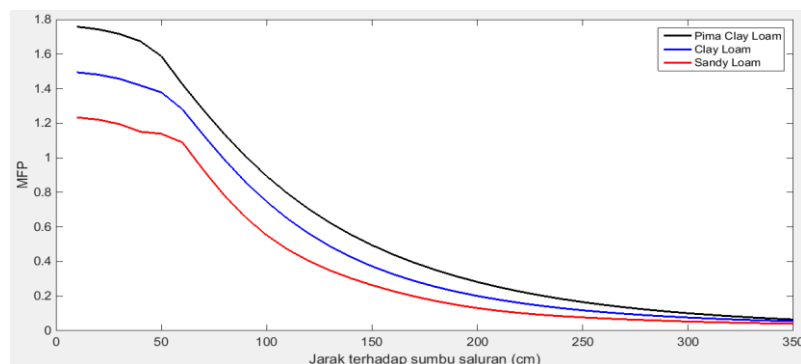


Gambar 7. Distribusi nilai MFP saluran irigasi tunggal di sepanjang $X = 350$ cm

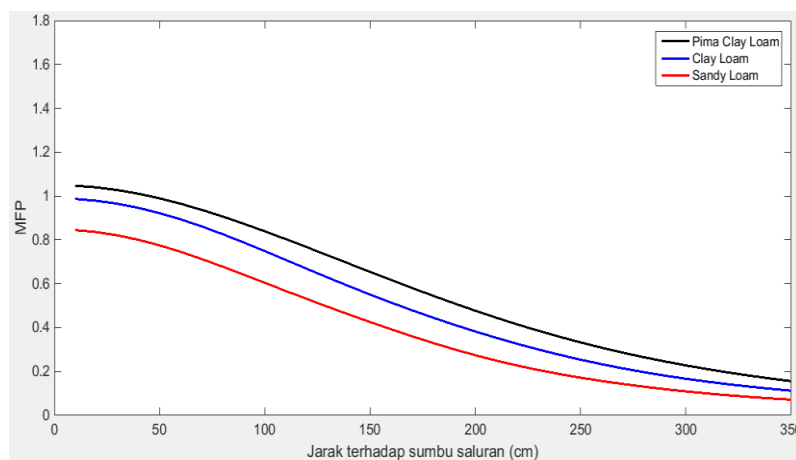
Gambar 7 memperlihatkan distribusi nilai MFP tak berdimensi di titik-titik yang cukup jauh dari saluran, yakni $X = 350$ cm. Dari grafik terlihat bahwa semakin bertambah kedalaman, dengan nilai yang sangat kecil, nilai MFP tak berdimensi terus membesar sampai kedalaman 350 cm. Seperti penjelasan pada kasus-kasus sebelumnya, hal ini mengindikasikan bahwa kandungan air meningkat sampai kedalaman 350 cm. Tentu saja kandungan airnya sangat kecil karena jauhnya posisi titik-titik tersebut dari saluran. Dari gambar tersebut juga terlihat bahwa tidak ada perbedaan nilai MFP yang signifikan pada kasus keempat saluran tersebut. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kandungan air di titik-titik yang cukup jauh dari saluran akan cenderung sama.

Berikutnya dibahas tentang distribusi nilai MFP tak berdimensi dengan diambil titik-titik di dalam tanah dengan arah horisontal. Variasi nilai MFP tak berdimensi di sepanjang kedalaman 50 cm dapat dilihat pada Gambar 8. Dari gambar terlihat bahwa nilai MFP tak berdimensi titik-titik di sepanjang kedalaman

tersebut berkurang seiring bertambah jauhnya titik-titik tersebut dari saluran. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan air pada tingkat tanah yang dekat dengan saluran lebih tinggi daripada bagian yang lebih jauh. Dari gambar juga terlihat bahwa sampai jarak sekitar 65 cm dari sumbu saluran terdapat perbedaan cukup signifikan nilai MFP tak berdimensi antara tekstur tanah yang satu dengan lainnya. Nilai MFP tak berdimensi tertinggi berturut-turut terjadi pada tekstur tanah *Pima Clay Loam*, *Clay Loam*, dan *Sandy Loam*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa sampai jarak sekitar 65 cm dari saluran pada kedalaman 65 cm, kandungan air pada tekstur tanah *Pima Clay Loam* paling tinggi di antara yang lainnya. Nilai MFP tak berdimensi setiap tekstur tanah akan semakin cenderung sama seiring bertambah jauhnya jarak terhadap sumbu saluran. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin jauh dari saluran pada kedalaman yang sama, kandungan air akan cenderung sama.

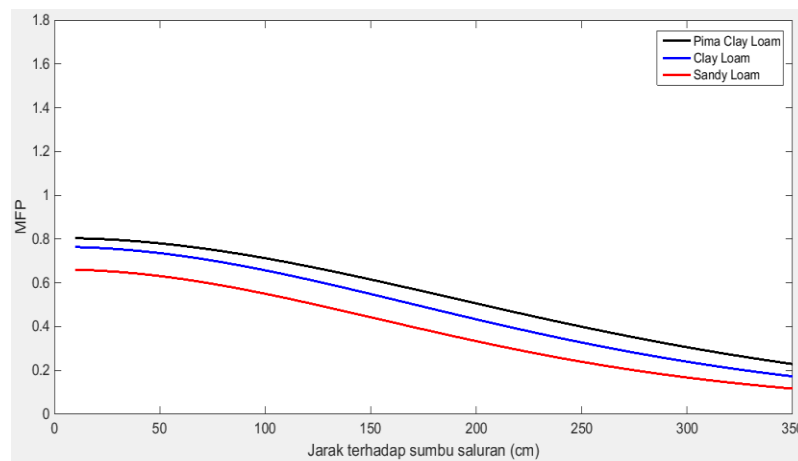


Gambar 8. Distribusi nilai MFP saluran irigasi tunggal di sepanjang $Z = 50$ cm



Gambar 9. Distribusi nilai MFP saluran irigasi tunggal di sepanjang $Z = 200$ cm

Gambar 9 dan Gambar 10 masing-masing memperlihatkan nilai MFP tak berdimensi di titik-titik sepanjang kedalaman 200 cm dan 350 cm. Dengan membandingkan kedua gambar dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya kedalaman, maka nilai-nilai MFP tak berdimensi pada keempat saluran akan cenderung kecil dan sama. Hal ini mengindikasikan bahwa di titik-titik yang semakin jauh dari saluran, kandungan airnya akan semakin kecil dan cenderung sama. Jadi semakin bertambah kedalaman tanah, pengaruh tekstur tanah semakin tidak signifikan.



Gambar 10. Distribusi nilai MFP saluran irigasi tunggal di sepanjang $Z = 350$ cm

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang bisa diperoleh :

1. Masalah infiltrasi stasioner pada saluran irigasi tunggal berbentuk trapesium di beberapa jenis tanah homogen yang mendominasi di Kabupaten Tegal dapat diselesaikan secara numerik dengan menggunakan *Dual Reciprocity Boundary Element Method*.
2. Semakin halus tekstur suatu tanah, maka tanah tersebut lebih dapat menahan air. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 3.1 – Gambar 3.6 yang menunjukkan bahwa tanah *Pima Clay Loam* yang bertekstur paling halus mempunyai kandungan air yang paling tinggi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada pihak Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Pancasakti Tegal yang telah memfasilitasi penelitian yang berkaitan dengan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amoozegar-Fard, A., Warrick, A. W., dan Lomen, D. O., *Design Nomographs for Trickle Irrigation Systems*, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **110**(2)(1984), 107–120, doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1984)110:2(107).
- Ang, W. T., *A Beginners Course in Boundary Element Methods*, Universal Publishers, Florida, 2007.
- Azis, M. I., Clements, D. L., dan Lobo, M., *A Boundary Element Method for Steady Infiltration from Periodic Channels*, *ANZIAM J.*, **44** (2003), C61–C78.
- Batu, V., *Steady Infiltration from Single and Periodic Strip Sources*, *Soil Science Society of America Journal*, **42**(4)(1978), 544-549, doi:10.2136/sssaj1978.03615995004200040002x.
- Clements, D. L., dan Lobo, M., *A BEM for Time Dependent Infiltration from an Irrigation Channel*, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **34** (2010), 1100-1104.
- Inayah, N., Manaqib, M., dan Majid, W. N., *Furrow Irrigation Infiltration in Various Soil Types Using Dual Reciprocity Boundary Element Method*, *AIP Conference Proceedings* 2329, 2021.
- Lobo, M., *Boundary Element Methods for the Solution of a Class of Infiltration Problems*, Doctor Dissertation, Faculty of Engineering, Computer and Mathematical Sciences, University of Adelaide, 2008.
- Munadi, *Dual Reciprocity Boundary Element Methods (DRBEM) pada Masalah Infiltrasi Stasioner dari suatu Saluran Irigasi Tunggal*, Disertasi, Departemen Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, 2021.

- Pemerintah Desa Kandangan Tucuk Bojonegoro, *Pembuatan Saluran Air untuk Pertanian Terus Ditingkatkan*, Desa Kandangan Tucuk Bojonegoro, 2017.
<http://kandangan-bjn-.desa.id/2017/12/pembuatan-saluran-airuntuk-pertanian.html>, diakses pada 22 Maret 2018.
- Pemerintah Kabupaten Tegal, *Rencana Tata Ruang Wilayah Tahun 2012-2032*, Sekretariat Daerah Kabupaten Tegal, Tegal, 2012.
- Republik Indonesia, *Peraturan Pemerintah Tentang Irigasi*, Sekretariat Negara, Jakarta, 2006.
- Solekhudin, I., *A Dual Reciprocity Boundary Element Method for Steady Infiltration Problems*, Australian and New Zealand Industrial and Applied Mathematics Journal (ANZIAM), **54** (2013), 171-180.