

Perbandingan Profil Penurunan Muka Air untuk Akuifer Tidak Terkekang Menggunakan 3D Modflow Studi Kasus Pantai Indah Kapuk

Amalia Susanto ^{[1]*}, Budijanto Widjaja ^[1], Martin Wijaya ^[1]

^[1]Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, 40141, Indonesia

Email: susantoamalia@gmail.com*

^{*}) Correspondent Author

Received: 04 August 2024; Revised: 13 November 2024; Accepted: 17 February 2025

How to cited this article:

Susanto, A., Widjaja, B., Wijaya, M., (2025). Perbandingan Profil Penurunan Muka Air untuk Akuifer Tidak Terkekang Menggunakan 3D Modflow Studi Kasus Pantai Indah Kapuk. Jurnal Teknik Sipil, 21(2), 306–318.

<https://doi.org/10.28932/jts.v21i2.9647>

ABSTRAK

Dewatering diperlukan untuk mengendalikan aliran air tanah serta menurunkan posisi muka air tanah pada saat galian dilakukan. Dalam melakukan perencanaan sistem dewatering, dibutuhkan parameter yang berkaitan dengan aliran air dalam tanah. Salah satunya adalah nilai konduktivitas, yang dapat diperoleh dari pengujian pemompaan. Lapisan pasir yang didapatkan dari permukaan tanah, yang jenuh air disebut sebagai akuifer tidak terkekang. Dalam penelitian ini, penentuan parameter konduktivitas pada akuifer tidak terkekang dilakukan pada area PIK 2 dengan menggunakan 3 metode konvensional yakni, metode Thiem (1906) serta metode pencocokan kurva dari Boulton (1963) dan Neuman (1972). Nilai konduktivitas yang didapat dari perhitungan knvensional kemudian dianalisis menggunakan bantuan program berbasis metode beda hingga yaitu 3D Modflow untuk mendapatkan profil penurunan muka air tanah. Pada tanah pasir di area reklamasi PIK 2 diperoleh nilai konduktivitas sebesar 5.90×10^{-5} m/s hingga 8.08×10^{-5} m/s. Metode Neuman dapat menghasilkan nilai konduktivitas yang lebih baik pada akuifer tidak terkekang dibandingkan dua metode lainnya berdasarkan profil penurunan muka air tanah dari analisis 3D Modflow.

Kata kunci: Akuifer Tidak Terkekang, konduktivitas, Dewatering, Uji Pemompaan.

ABSTRACT. Comparison of Water Table Decline Profiles for Unconfined Aquifers Using 3D Modflow: The Case Study of Pantai Indah Kapuk. Dewatering is required to control the flow of groundwater and to lower the position of the groundwater table during excavation. In planning the dewatering system, parameters related to the flow of water in the soil are required. One of these is the conductivity value, which can be obtained from pumping tests. The sand layer found on the ground surface, which is saturated of water, is referred to as an unconfined aquifer. In this study, conductivity analysis of unconfined aquifer was conducted in PIK2 area using 3 conventional methods which are, Thiem (1906) method and curve matching method of Boulton (1963) and Neuman (1972). Conductivity values obtained from conventional calculations are then analyzed using the help of a program based on the 3D finite difference method Modflow to obtain a pattern of groundwater level decline or can also be called a depression cone. In sandy soil in the PIK2 reclamation area, conductivity values of 5.90×10^{-5} m/s to 8.08×10^{-5} m/s were obtained Neuman's method can produce better conductivity values in unconfined aquifers, as shown by the results of the water table profile from the 3D Modflow analysis.

Keywords: Unconfined Aquifer, Conductivity, Dewatering, Pumping Test.



@2025 The Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Keterbatasan lahan membuat pembangunan bergeser pada area reklamasi dan semakin banyaknya jumlah basement yang direncanakan, salah satu tantangan yang dihadapi dalam konstruksi bawah tanah seperti galian *basement* adalah aliran air di dalam tanah. Tekanan akibat aliran air tersebut dapat mengganggu jalannya konstruksi. Sehingga penentuan parameter-parameter hidraulik menjadi sangat penting.

Salah satu implementasi penggunaan parameter hidraulik adalah dalam merencanakan pekerjaan *dewatering*. Parameter konduktivitas tanah (k) sangatlah penting dalam melakukan perencanaan atau *design dewatering*. Uji lapangan yang umum digunakan adalah berupa uji pemompaan (*pumping test*).

Menurut Kruseman (1983), lapisan pasir yang jenuh air dapat disebut sebagai akuifer. Jika dari permukaan tanah sudah diperoleh lapisan pasir jenuh air maka dapat disebut sebagai akuifer tidak terkekang (*unconfined aquifer*).

1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan menganalisis beberapa metode konvensional yang biasa digunakan dalam perhitungan konduktivitas dari hasil uji pemompaan untuk kasus akuifer tidak terkekang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perbandingan antara beberapa metode perhitungan konvensional penentuan konduktivitas dengan melakukan analisis balik menggunakan software 3D Modflow untuk menghasilkan penurunan muka air tanah yang paling mendekati penurunan muka air tanah pada hasil uji pemompaan di lapangan di area reklamasi Jakarta. Peta lokasi area studi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Area Studi (Google Maps)

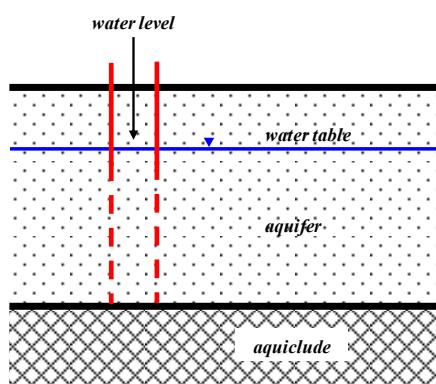
2. METODOLOGI

2.1. Metode Penelitian dan Lingkup Pembahasan

Pengujian pemompaan pada area yang memiliki akuifer tidak terkekang dianalisis menggunakan metode yang sering digunakan oleh para praktisi dalam melakukan analisis konduktivitas tanah yakni, metode konvensional dari metode Thiem (1906) serta metode pencocokan kurva dari metode Boulton (1963) dan metode Neuman (1972). Nilai konduktivitas dari masing-masing metode tersebut kemudian digunakan dalam analisis numerik dengan bantuan *software* berbasis metode beda hingga 3D Modflow. Penggunaan *software* tersebut adalah untuk mendapatkan profil *depression cone* atau profil penurunan muka air tanah akibat pemompaan. Berdasarkan hasil analisis kemudian dapat ditentukan dari metode yang baik dari ketiga metode konvensional tersebut yang dapat menghasilkan profil penurunan muka air tanah yang sesuai dengan uji pemompaan di lapangan.

2.2. Akuifer Tidak Terkekang (*Unconfined Aquifer*)

Menurut Kruseman & De Ridder (1983), akuifer merupakan suatu lapisan batuan atau tanah yang mampu menyimpan dan mengalirkan air. Akuifer juga dapat diartikan sebagai suatu formasi geologi atau batuan yang mengandung air dan bersifat *permeable*. Contoh dari lapisan akuifer adalah pasir, kerikil, dan batu pasir. Akuifer tidak terkekang dapat juga disebut sebagai *water table aquifer*. Akuifer tidak terkekang merupakan salah satu dari jenis akuifer di mana akuifer ditemui dari permukaan tanah dan dibatasi oleh lapisan kedap air di bagian terbawahnya (Gambar 2). Air tanah pada akuifer ini disebut juga sebagai air tanah dangkal (umumnya kedalaman muka air tanah kurang dari 20 m).



Gambar 2. Akuifer tidak terkekang (Kruseman & De Ridder, 1983)

2.3. Uji Pemompaan (*Pumping Test*)

Pengujian lapangan berupa uji pemompaan dilakukan untuk memperoleh debit dan data penurunan muka air tanah akibat pemompaan dalam durasi tertentu (Gambar 3). Uji ini umumnya

menggunakan 1 sumur uji (*pumping well*, PW) serta 6 sumur pantau (*observation well*, OW) dan dilakukan untuk waktu 3×24 jam atau hingga kondisi *steady* tercapai. Komponen utama dalam uji pemompaan adalah:

1. *Pompa submersible*

Pompa digunakan untuk mengeluarkan air keluar dari sumur uji. Pompa *submersible* harus diletakkan di dalam sumur uji dalam posisi terendam sepenuhnya.

2. Sumber listrik

Listrik yang stabil diperlukan untuk menyalakan pompa *submersible* secara terus menerus selama pengujian berlangsung. Sumbernya dapat dari listrik PLN atau *generator set*.

3. *Dipmeter*

Pengukuran fluktuasi muka air tanah akibat pemompaan dilakukan dengan menggunakan alat ukur *dipmeter*. Alat ini berbentuk seperti meteran gulung dengan sebuah sensor di ujung teratasnya yang jika bersentuhan dengan air akan mengeluarkan suara.

4. Meteran air (*Flowmeter*)

Meteran air digunakan untuk mengukur debit air yang keluar dari sumur uji akibat pemompaan.

Uji pemompaan memiliki 2 fase yakni fase pemompaan (*pumping*) dan fase pemulihan (*recovery*). Pada fase pemompaan, pompa dinyalakan terus-menerus hingga kondisi muka air tanah *steady* (kondisi beda penurunan muka air tanah yang relatif kecil). Sedangkan pada fase pemulihan, pompa dimatikan dan kenaikan muka air tanah dibaca secara berkala dengan interval tertentu (Tabel 1).

Tabel 1. Interval Pembacaan Muka Air Tanah (Powers, 2007)

No.	Interval Pembacaan	Waktu Pembacaan
1.	15 detik	0 – 1 menit awal
2.	30 detik	1 menit sampai 5 menit
3.	1 menit	5 menit sampai 10 menit
4.	5 menit	10 menit sampai 60 menit
5.	10 menit	60 menit sampai 200 menit
6.	30 menit	200 menit sampai 4430 menit*

Catatan: *waktu pengujian dapat dihentikan hingga terjadi kondisi *steady*.



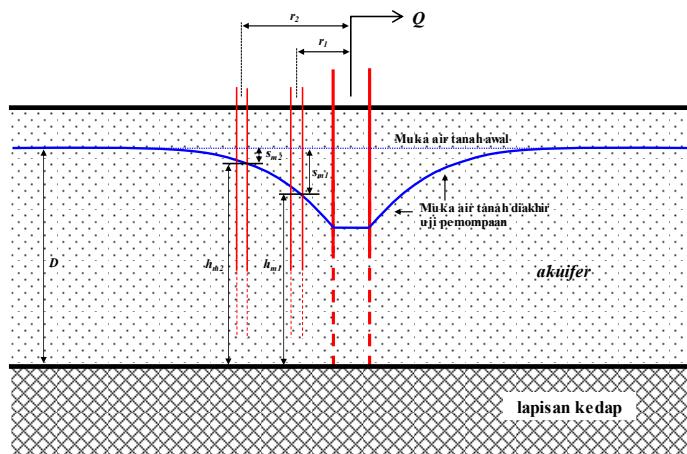
Gambar 3. Ilustrasi uji pemompaan (Tarumenegara Bumiyasa, 2021)

2.4. Metode Thiem (1906)

Penentuan parameter konduktivitas yang digagas oleh Thiem (1906) menggunakan persamaan (1) berdasarkan uji pemompaan pada akuifer tidak terkekang (Gambar 4).

$$Q = \pi k \frac{h_2^2 - h_1^2}{2,3 \log(r_2/r_1)} \quad (1)$$

dengan Q adalah debit pompa (m^3/s), k adalah konduktivitas tanah (m/s), D adalah tebal akuifer (m), h adalah tinggi muka air tanah pada sumur yang ditinjau (m) dan r adalah jarak sumur yang ditinjau dengan sumur uji (m).



Gambar 4. Uji pemompaan pada akuifer tidak terkekang untuk Metode Thiem (Kruseman & De Ridder, 1983).

2.5. Metode Boulton (1963)

Boulton (1963) merupakan yang pertama mengenalkan konsep *delayed water table response* atau “*delayed yield*”. Kurva yang digunakan di dalam metode ini disebut sebagai kurva *time yield*. Kurva ini nantinya yang dipakai untuk dicocokan dengan kurva penurunan muka air tanah dan waktu dari uji pemompaan. Gambar 5 menunjukkan kurva yang digunakan dalam

pencocokan kurva penurunan muka air tanah dan waktu dari uji pemompaan dalam skala logaritma. Persamaan (2) adalah persamaan yang digunakan untuk metode Boulton.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w \left(u_A, u_B, \frac{r}{D} \right), \frac{r}{D} = r \sqrt{\frac{\alpha_1 S_y}{T}}, \alpha_1 = \frac{T}{S_y D^2} \quad (2)$$

Persamaan (2) tersebut disederhanakan menjadi sebagai berikut:

1. Fase awal pemompaan

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w \left(u_A, \frac{r}{D} \right) \quad (3)$$

$$u_A = \theta = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (4)$$

2. Fase akhir pemompaan

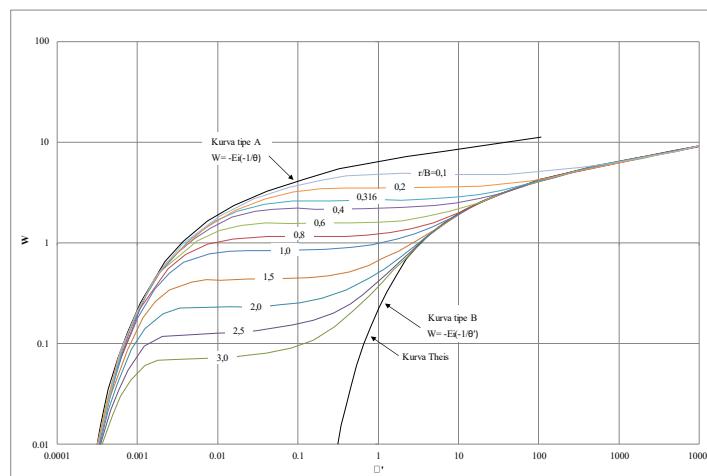
$$s = \frac{Q}{4\pi T} w \left(u_B, \frac{r}{D} \right) \quad (3)$$

$$u_B = \theta' = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (4)$$

Parameter konduktivitas tanah dapat dihitung dengan persamaan (5).

$$k = \frac{T}{D} \quad (5)$$

dengan s adalah penurunan muka air tanah (m), r adalah jarak sumur yang ditinjau ke sumur uji (m), S adalah storativitas, S_y adalah *specific yield*, u_A atau θ adalah parameter tipe-A untuk waktu awal, u_B atau θ' adalah parameter tipe-B untuk waktu akhir, T adalah *transmissivity* (m^2/s), Q adalah debit pemompaan (m^3/s), D adalah tebal akuifer (m), k adalah konduktivitas tanah (m/s), dan t adalah waktu (s)



Gambar 5. Kurva *delayed yield* (Boulton, 1963)

2.6. Metode Neuman

Neuman (1972) mengembangkan metode pencocokan kurva yang merupakan pengembangan dari metode Boulton (Gambar 6). Neuman menyimulasikan *delayed water table*

response dengan parameter storativitas (S_A) dan *specific yield* (S_y) dianggap konstan. Persamaan untuk memperoleh penurunan muka air tanah Neuman dapat dilihat di Persamaan (6).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w(u_A, u_B, \beta), \quad \beta = \left(\frac{r}{D}\right)^2 \frac{k_v}{k_h} \quad (6)$$

Persamaan (6) dapat disederhanakan menjadi:

1. Fase awal pemompaan

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w(u_A, \beta) \quad (7)$$

$$u_A = \frac{r^2 S_A}{4Tt} \quad (8)$$

2. Fase akhir pemompaan

$$s = \frac{Q}{4\pi T} w(u_B, \beta) \quad (9)$$

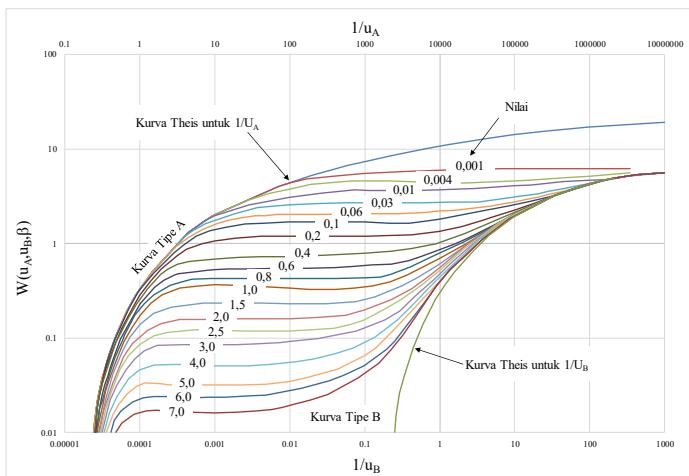
$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (10)$$

Parameter konduktivitas tanah horizontal dan vertikal dapat dihitung dengan persamaan (11) dan persamaan (12) secara berurutan.

$$k_h = \frac{T}{D} \quad (11)$$

$$k_v = \beta k_h \left(\frac{D}{r}\right)^2 \quad (12)$$

dengan s adalah penurunan muka air tanah (m), r adalah jarak sumur yang ditinjau ke sumur uji (m), S_A adalah storativitas, S_y adalah *specific yield*, u_A adalah parameter tipe-A untuk waktu awal, u_B adalah parameter tipe-B untuk waktu akhir, T adalah *transmissivity* (m^2/s), Q adalah debit pemompaan (m^3/s), t adalah waktu (s), k_h adalah konduktivitas arah horizontal (m/s), k_v adalah konduktivitas arah vertikal (m/s), dan D adalah tebal akuifer (m)

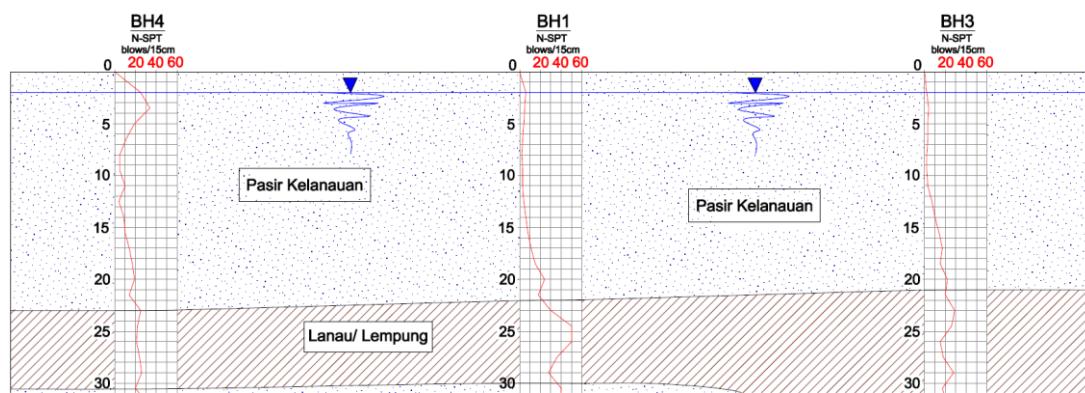


Gambar 6. Kurva *delayed yield* dari metode Neuman (1972)

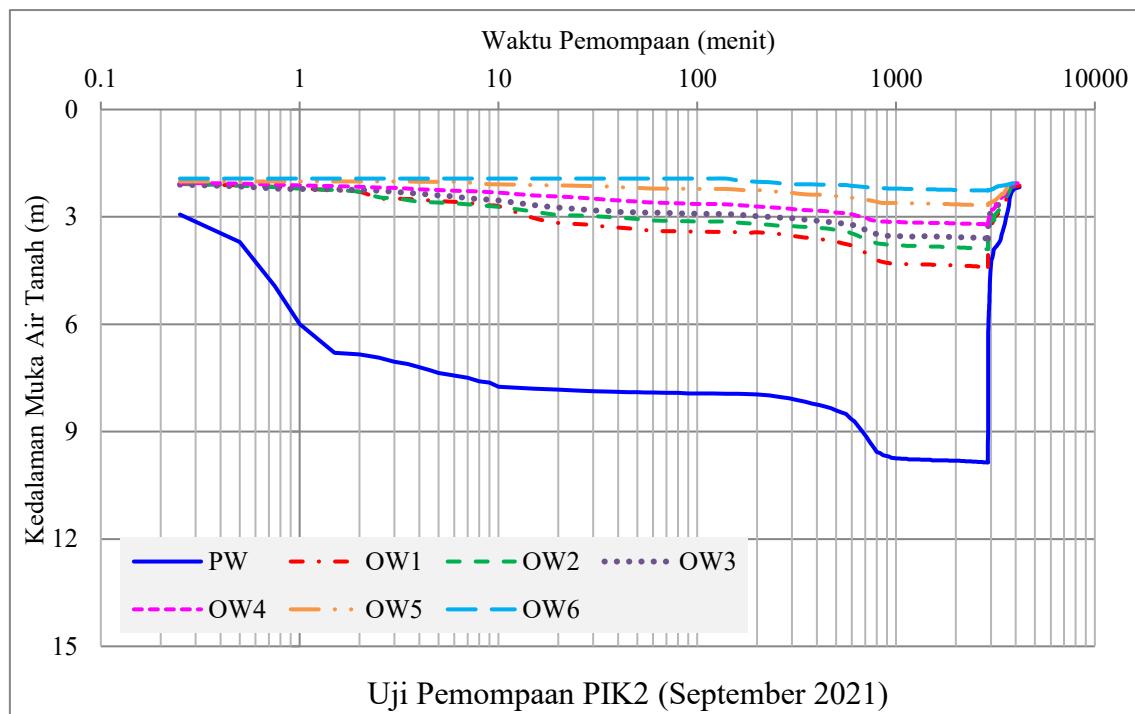
3. HASIL

3.1. Uji Pemompaan

Area yang diuji berada pada area reklamasi di daerah PIK2-Tangerang. Berdasarkan hasil penyelidikan tanah yang ditampilkan pada Gambar 7, terdapat lapisan pasir kelanauan dari permukaan tanah hingga sekitar kedalaman 22.00 m. Kedalaman muka air tanah ditemukan pada 2.00 m. Pada lokasi uji ini, pompa diletakkan pada kedalaman 18.00 m dan menghasilkan debit sebesar 263.70 l/min. Hasil penurunan muka air tanah pada masing-masing sumur terhadap waktu pemompaan dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Profil lapisan tanah di lokasi PIK2



Gambar 8. Profil penurunan muka air tanah terhadap waktu pemompaan

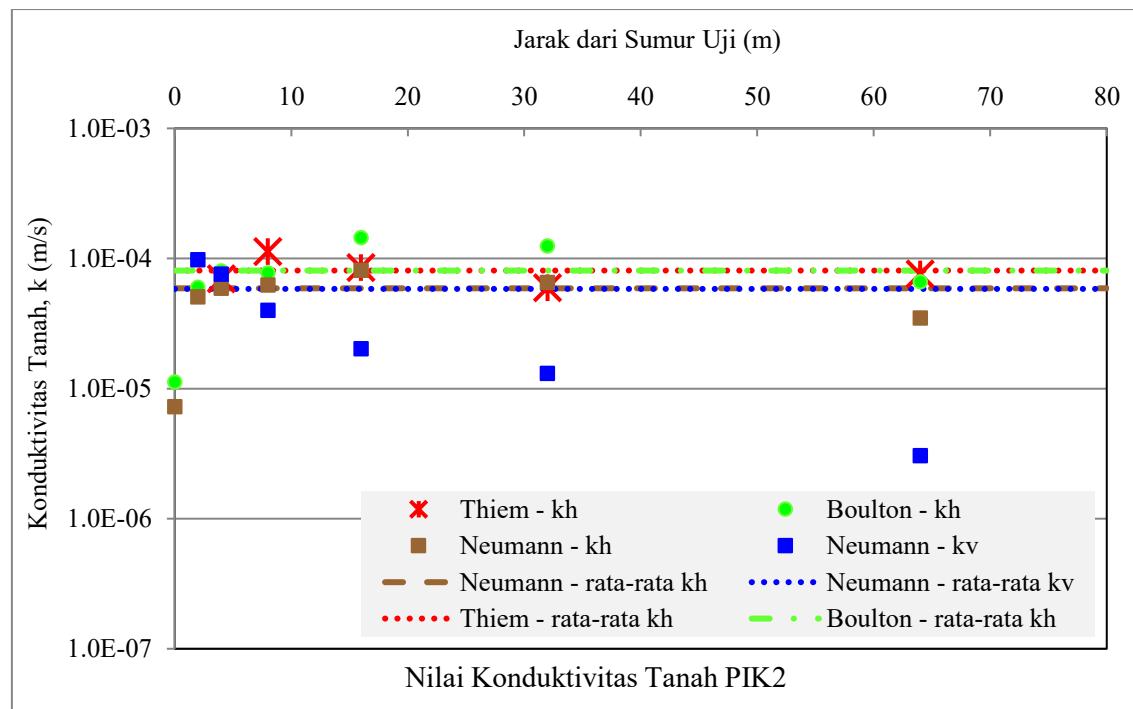
3.2. Metode Konvensional Perhitungan Konduktivitas Tanah

Hasil perhitungan nilai konduktivitas dengan menggunakan metode konvensional memperoleh rentang nilai sebesar 5.90×10^{-5} m/s sampai dengan 8.08×10^{-5} m/s. melalui metode Neuman didapat rasio konduktivitas tanah arah horizontal dan vertikal (k_h/k_v) sebesar 1.01. Nilai konduktivitas tanah masing-masing sumur dapat dilihat pada Gambar 9 dan Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Konduktivitas Tanah

Sumur	Jarak dari PW (m)	Neuman		Boulton	Thiem
		k_h (m/s)	k_v (m/s)	k_h (m/s)	k_h (m/s)
PW	0	7.24×10^{-6}	-	1.12×10^{-5}	-
OW1	2.00	5.08×10^{-5}	9.76×10^{-5}	6.00×10^{-5}	-
OW2	4.00	6.91×10^{-5}	7.56×10^{-5}	8.04×10^{-5}	6.99×10^{-5}
OW3	8.00	6.24×10^{-5}	4.00×10^{-5}	7.74×10^{-5}	1.13×10^{-4}
OW4	16.00	8.10×10^{-5}	2.02×10^{-5}	1.45×10^{-4}	8.50×10^{-5}
OW5	32.00	6.56×10^{-5}	1.31×10^{-5}	1.25×10^{-4}	5.96×10^{-5}
OW6	64.00	3.50×10^{-5}	3.06×10^{-6}	6.62×10^{-5}	7.60×10^{-5}
Nilai rata-rata		5.90×10^{-5}	5.84×10^{-5}	8.07×10^{-5}	8.08×10^{-5}

Catatan: PW adalah sumur uji, OW adalah sumur pantau, k_h adalah konduktivitas tanah arah horizontal, dan k_v adalah konduktivitas arah vertikal



Gambar 9. Gabungan nilai konduktivitas tanah terhadap jarak dari sumur uji

3.3. Analisis Numerik

Dengan menggunakan nilai konduktivitas dari masing-masing hasil perhitungan metode konvensional, dilakukan analisis numerik dengan menggunakan bantuan program komputer berbasis metode beda hingga (FDM) 3D Modflow berupa perbandingan profil penurunan muka air tanah. Model dan parameter dalam program 3D Modflow dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4. Nilai k_v dari metode Boulton dan Thiem diasumsikan memiliki rasio yang sama dengan nilai rasio k_h/k_v dari metode Neuman. Penentuan radius pengaruh pada awal perhitungan adalah dengan menggunakan penarikan garis dari kurva trendline penurunan muka air tanah pada waktu akhir pemompaan dengan jarak sumur dalam skala logaritma (Gambar 10) sebagai acuan dalam penentuan batasan area yang akan dianalisis (dimensi untuk di masukan dalam *model domain*) dalam program 3D Modflow.

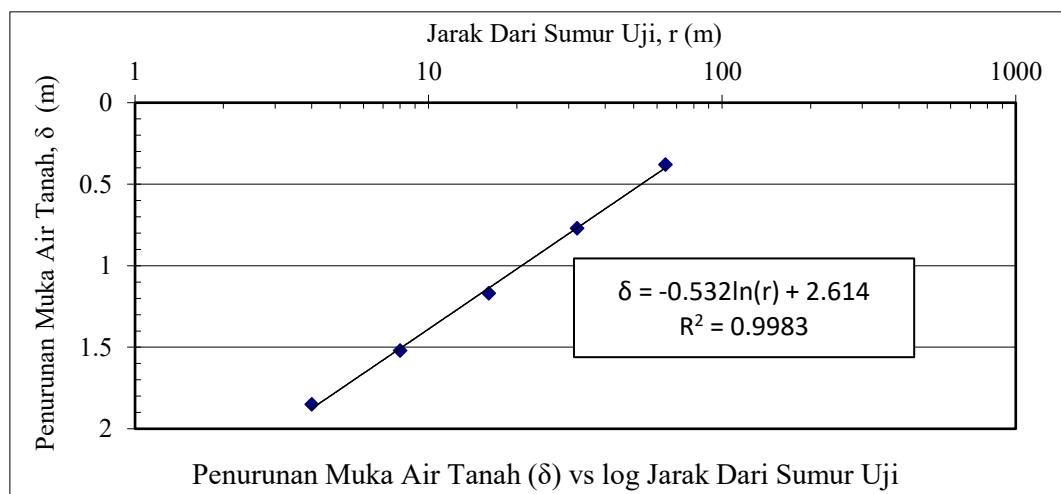
Tabel 3. Pemodelan dalam Program 3D Modflow

Parameter	Nilai Parameter	satuan
Dimensi <i>model domain</i>	136.00	m
Elevasi Pompa	-18.00	m
Muka Air Tanah Awal	-2.00	m
Debit Pompa	379.73	m^3/hari
Konduktivitas Tanah	tertera di Tabel 4	m/s

Tabel 4. Parameter Konduktivitas Dalam Analisis 3D Modflow

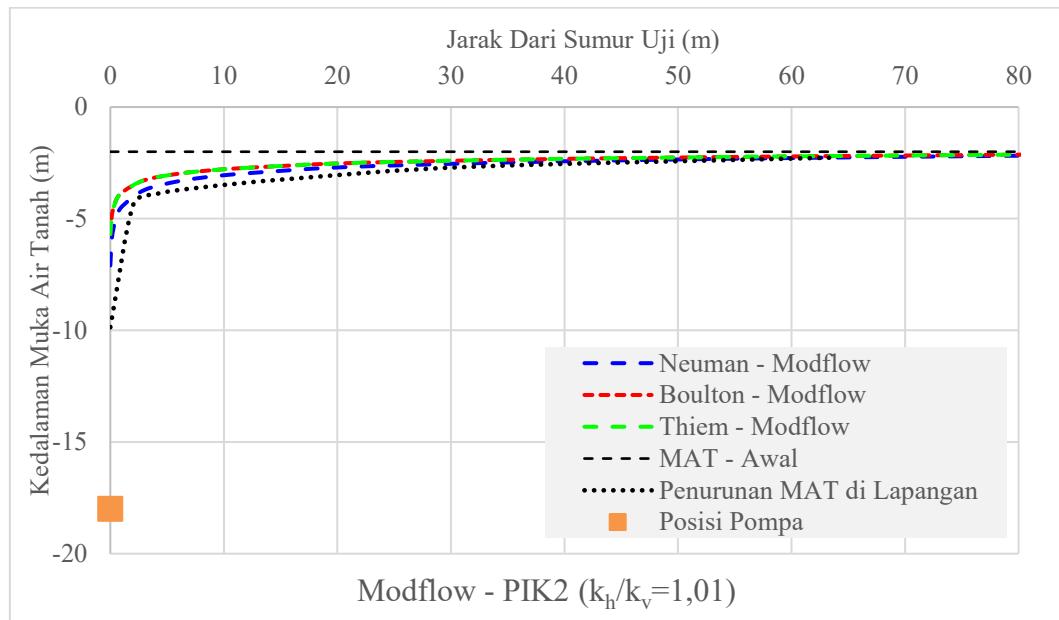
Metode Konvensional	Neuman		Boulton	Thiem
	k_h (m/s)	k_v (m/s)	k_h (m/s)	k_h (m/s)
Nilai rata-rata	5.90×10^{-5}	5.84×10^{-5}	8.07×10^{-5}	8.08×10^{-5}

Catatan: k_h adalah konduktivitas tanah arah horizontal, dan k_v adalah konduktivitas arah vertikal



Gambar 10. Kurva penurunan muka air tanah dengan jarak sumur

Dari hasil analisis 3D Modflow didapatkan profil penurunan muka air tanah berdasarkan masing-masing metode perhitungan konduktivitas tanah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Pola penurunan muka air tanah atau dapat disebut juga sebagai *depression cone*. Analisis menggunakan nilai k dari metode Neuman, memberikan profil yang paling mendekati hasil penurunan muka air tanah di lapangan.



Gambar 11. *Depression cone* hasil analisis 3D Modflow

4. DISKUSI

Hasil penurunan muka air tanah terhadap jarak, dapat menghasilkan profil yang disebut sebagai *depression cone*. *Depression cone* pada hasil konduktivitas metode Boulton berhimpit dengan hasil dari metode Thiem. Hal ini dikarenakan nilai k dari kedua metode tersebut memiliki nilai yang cukup berdekatan. Dengan membandingkan hasil dari masing-masing metode konvensional, dapat dikatakan bahwa penggunaan metode pencocokan kurva Neuman memberikan hasil yang paling mendekati hasil dari penurunan muka air tanah dari uji lapangan. Selain itu, metode Neuman dapat memprediksi nilai konduktivitas arah vertikal selain arah horisontal.

Dibandingkan dengan metode Thiem, metode Neuman ini lebih baik karena mencocokkan kurva penurunan muka air tanah terhadap waktu dengan kurva *delayed yield* Neuman. Perbandingan metode Boulton dan Neuman menunjukkan bahwa metode Neuman dapat memberikan hasil yang lebih mendekati hasil penurunan muka air tanah di lapangan. Hal ini dapat disebabkan kurva *delayed yield* metode Neuman memberikan pembagian parameter kompresibilitas yang lebih detail dibandingkan metode Boulton.

Namun, rentang nilai konduktivitas tanah yang dihasilkan dari metode Boulton dan Thiem menghasilkan nilai yang cukup mendekati nilai konduktivitas tanah yang diperoleh dari metode Neuman. Secara keseluruhan hasil studi cukup memuaskan. Dalam praktiknya, untuk menganalisis konduktivitas dengan melakukan perhitungan dengan cepat, metode Thiem masih dapat digunakan dengan kemudian perlu adanya dilakukan pengecekan ulang dengan menggunakan metode Neuman.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil penelitian ini adalah nilai konduktivitas tanah pada akuifer tidak terkekang di area reklamasi PIK2 berada pada rentang nilai 5.90×10^{-5} m/s hingga 8.08×10^{-5} m/s. Metode Neuman merupakan metode konvensional yang memberikan hasil yang paling mendekati penurunan muka air tanah di lapangan dalam perhitungan konduktivitas pada akuifer tidak terkekang yang ditunjukkan melalui analisis menggunakan 3D Modflow. Sehingga dapat disimpulkan dalam melakukan analisis konduktivitas pada akuifer tidak terkekang, metode Neuman adalah metode yang paling cocok untuk digunakan.

Studi ini dapat dilanjutkan dengan menambahkan pengujian laboratorium untuk mengetahui kaitan dari gradasi butir, angka pori dan porositas dengan nilai konduktivitas tanah. Hal ini perlu untuk dilakukan mengingat tidak semua proyek dapat melakukan pengujian pemompaan dilapangan, sehingga dengan adanya studi lanjut penentuan konduktivitas melalui sifat fisik tanah dapat memberikan manfaat yang sangat besar bagi para praktisi.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Tarumanegara Bumiyasa untuk data pengujian pemompaan yang digunakan penulis dalam penelitian ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

- ASTM. (2008). Standard Test Method for (Field Procedure) for Withdrawal and Injection Well Tests for Determining Hydraulic Properties of Aquifer Systems. *ASTM Standard Test Method, D4050-96* ((February 1997), 1–4. <https://doi.org/10.1520/D4050-20.2>
- Boulton, N. S. (1970). Analysis of data from pumping tests in unconfined anisotropic aquifers. *Journal of Hydrology*, 10(4), 369–378. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90223-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90223-4)
- Boulton, N. S., & Pontin, J. M. A. (1971). An extended theory of delayed yield from storage applied to pumping tests in unconfined anisotropic aquifers. *Journal of Hydrology*, 14(1), 53–65. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(71\)90092-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90092-8)
- Boulton, N. S., Ineson, J., & Engelund, F. (1955). Correspondence. The Drawdown of the Water-Table Under Non-Steady Conditions Near a Pumped Well in an Unconfined Formation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 4(2), 213–218.

<https://doi.org/10.1680/ipeds.1955.11846>

- Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon, V. Dalmont, Paris, 647 pp.
- Driscoll, F.G (1986). *Groundwater and Wells (2nd edition)*. Johnson Filtration Systems Inc.
- Ismail, S. O., & Mawlood, D. (2020). Comparing pumping test between Boulton and Neuman in unconfined aquifer. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, 32(2). <https://doi.org/10.21271/zjpas.32.2.2>
- Kruseman, G. P., & De Ridder, N. A. (1983). *Analysis and evaluation of pumping test data (3rd edition)*. Bulletin - International Institute for Land Reclamation & Improvement (Wageningen), 11.
- Neuman, S. P. (1972), Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table, *Water Resour. Res.*, 8(4), 1031–1045,
- Paath, J. R., & Widjaja, B. (2017). Analisis Parameter Hidrogeologi Dengan Beberapa Metode Konvensional Di Akuifer Terkekang. *Seminar Nasionalke-2: Sains, Rekayasa & Teknologi UPH*, 17–18. <https://www.researchgate.net/publication/317312775>
- Paath, J. R., Widjaja, B., Studi, P., Teknik, M., Parahyangan, U. K., Studi, P., Sipil, T., & Parahyangan, U. K. (2017). *Analisis Permeabilitas Tanah Dari Hasil Pumping Test Dengan Beberapa Metode Konvensional*. 43–50.
- Powers, J. P. et al. (2007), *Construction Dewatering and Groundwater Control*. New Method and Applications 3rd edition.John Wiley and Sons Inc.
- United States Bureau of Land Management. (1995). Geohydrology: Analytical Methods. *Utah Regional Depository*, 244, 11–12. <https://digitalcommons.usu.edu/govdocs/244>