

PEMODELAN TIME-LAPSE MICROGRAVITY UNTUK ESTIMASI PERUBAHAN MUKA AIR TANAH DI BANDUNG, JAWA BARAT

TIME-LAPSE MICROGRAVITY MODELING TO ESTIMATE GROUNDWATER LEVEL CHANGES IN BANDUNG, WEST JAVA

Eko Januari Wahyudi^{1)*} Wawan Gunawan A. Kadir²⁾ Susanti Alawiyah³⁾ Setianingsih⁴⁾
Indra Gunawan⁵⁾ Dadi Abdurrahman⁶⁾

^{1,2,3,4,5,6)}Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10 Gedung BSC-B Lantai 2 Teknik Geofisika ITB, Bandung, Indonesia

*Correspondent email: ekojuw@itb.ac.id

Diterima: 12 Juli 2023; Direvisi: 26 September 2023; Disetujui: 13 Oktober 2023

ABSTRACT

Studies related to groundwater monitoring using geophysical methods have been carried out since the 1990s. Surface gravity data with a scheme of relative gravimeter measurements is chosen for monitoring in urban areas because it is quite fast, easy, affordable, and relatively low-impact on the environment. The significance of the time-lapse microgravity method for the target of this study depends on changes in the mass of water in the aquifer layer below the surface. The research area in this study covers the city of Bandung and several surrounding areas with an interpolated grid coverage of (18 x 17) km². Gravity changes were determined by six repeated surveys at the same observation points from 2010 to 2021. The aim of this research is to develop a method for estimating groundwater table changes based on time-lapse microgravity data modeling. The complexity of subsurface density changes is simplified for two parts related to near surface density changes and density changes in the intermediate aquifer layer. The trend of groundwater table data in 2010 is used as a reference to determine estimates for 2015, 2016 (February and August), 2019, and 2021. Modeling results for intermediate aquifers (confined groundwater system) provide changes in groundwater levels from 2010 with estimates reached ± 23 meters, while the results of modeling at near surface (shallow groundwater level) indicate a groundwater level change of approximately ± 8 meters from the year 2010.

Keywords: microgravity, groundwater, modeling, hydrology, aquifer.

ABSTRAK

Studi terkait pemantauan airtanah dengan metode geofisika telah dilakukan sejak tahun 1990-an. Data gravity di permukaan dengan skema pengukuran gravimeter relatif dipilih pada pemantauan di area perkotaan karena cukup cepat, mudah, murah, dan relatif tidak merusak lingkungan. Signifikansi metode time-lapse microgravity pada target studi ini bergantung pada perubahan massa air pada lapisan akuifer di bawah permukaan. Area penelitian pada studi ini mencakup Kota Bandung dan beberapa area di sekitarnya dengan cakupan luasan interpolasi grid (18 x 17) km². Perubahan gravitasi ditentukan oleh enam kali survei berulang pada beberapa titik pengamatan yang sama sejak 2010 sampai 2021. Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan metode untuk mengestimasi perubahan muka airtanah berdasarkan pemodelan data time-lapse microgravity. Kompleksitas perubahan densitas di bawah permukaan disederhanakan untuk dua bagian terkait perubahan densitas dekat permukaan dan perubahan densitas pada lapisan akuifer menengah. Kecenderungan dari data muka airtanah pada tahun 2010 digunakan sebagai acuan untuk menentukan estimasi pada tahun 2015, 2016 (Februari dan Agustus), 2019, dan 2021. Hasil pemodelan pada akuifer menengah (sistem airtanah tertekan) memberikan perubahan muka airtanah dari tahun 2010 dengan estimasi mencapai ± 23 meter, sedangkan hasil pemodelan pada kedalaman yang lebih dangkal (muka airtanah dangkal) menunjukkan perubahan muka airtanah mencapai ± 8 meter dari tahun 2010.

Kata Kunci: microgravity, airtanah, pemodelan, hidrologi, akuifer.

PENDAHULUAN

Estimasi sederhana untuk perubahan di dekat permukaan akibat land subsidence di Bandung telah dilakukan pada studi sebelumnya (Wahyudi, Hafidza, et al., 2021). Pada studi sederhana tersebut, secara statistik menunjukkan estimasi *Time-Lapse Microgravity* (TLM) di Bandung akibat land subsidence cukup kecil berkisar pada rentang nilai 0 - 11 $\mu\text{Gal}/\text{tahun}$ (rata-rata 2,58 $\mu\text{Gal}/\text{tahun}$). Nilai perubahan TLM yang lebih besar dapat diduga akibat sumber perubahan densitas pada kedalaman yang lebih dalam. Perubahan densitas pada rentang kedalaman yang masih cukup dekat permukaan serta dilakukan secara menerus (dipengaruhi oleh aktivitas manusia) di area perkotaan seperti Bandung berkaitan dengan pemanfaatan air tanah. Pada penelitian ini bertujuan untuk untuk memodelkan TLM di Bandung sebagai estimasi variasi muka air tanah (MAT) di bawah permukaan. Estimasi perubahan MAT dengan metoda tidak langsung ini diharapkan dapat memberikan khasanah yang lebih mudah dilakukan dan dapat dikorelasikan dengan data yang lebih akurat (seperti data di sumur pemantauan).

Studi observasi microgravity di Bandung telah dilakukan sejak tahun 2010 (bulan Agustus) sebagai baseline time-lapse microgravity (TLM). Pengukuran berulang pada titik observasi yang sama dilakukan pada tahun 2015, 2016 (Februari dan Agustus), 2019, dan 2021. Interpolasi dari TLM (pada selang waktu 56, 66, 72, 109, dan 149 bulan) ditunjukkan sebagai peta-peta pada Gambar 1. Anomali TLM selanjutnya dapat dimodelkan untuk mempelajari perubahan di dekat permukaan (amblesan tanah) dan perubahan di bawah permukaan (variasi MAT).

Peta geologi dan penampang geologi SB-UT daerah penelitian (Gambar 2) mengacu pada pekerjaan (Hutasoit, 2009) dan secara ringkas diklasifikasikan menjadi tiga hidrostratigrafi sebagai berikut:

1. Formasi Cikapundung terdiri dari konglomerat dan breksi yang memadat, tuf, dan lava andesit.
2. Formasi Cibeureum terdiri dari breksi dan endapan tufa yang terkonsolidasi sebagian, dengan beberapa intrusi lava.
3. Formasi Kosambi terdiri dari batulempung tidak terkonsolidasi, batulanau, dan batupasir.

Kompleksitas pada penampang vertikal dan data bor terkait hidrostratigrafi ditunjukkan pada beberapa literatur (seperti: (Delinom & Suriadarma, 2010; Hendarmawan, 2002; Hutasoit, 2009;

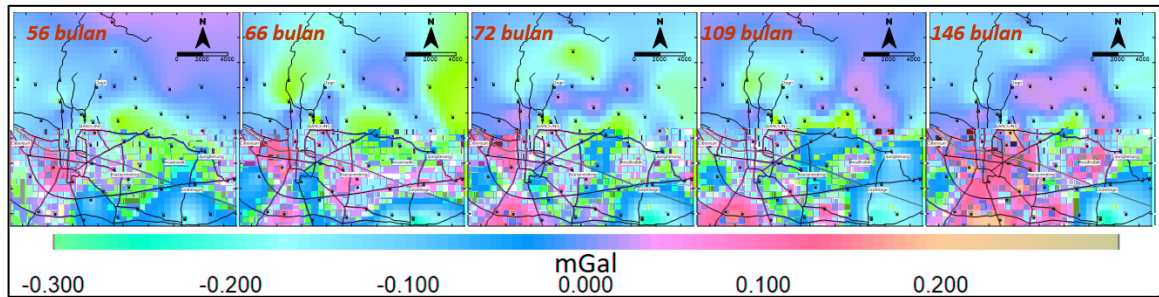
Nurliana & Eko Widodo, 2009; Sunarwan, 2011; Sunarwan et al., 2013; Taufiq et al., 2018; Yuningsih & Soewaeli, 2009)). Secara hidrostratigrafi, pada Cekungan Bandung dapat dibagi menjadi tiga unit hidrostratigrafi (UH-1, UH-2, dan UH-3) dengan dua kelompok air tanah sebagai berikut:

1. Kelompok air tanah bebas (dangkal) dengan aliran lokal merupakan UH-1 terdiri dari tiga lapisan: tuf berpasir, pasir berlempung dan lempung berlumpur, sebagai akuitar gabungan.
2. Kelompok air tanah semi tertekan dengan aliran menengah dan regional sebagai akuifer semi terkekang dan terkekang yang merupakan gabungan UH-2 dan UH-3. UH-2 terdiri dari dua lapisan: lanau berpasir dan batupasir tufaan, sedangkan UH-3 terdiri dari breksi tufaan.

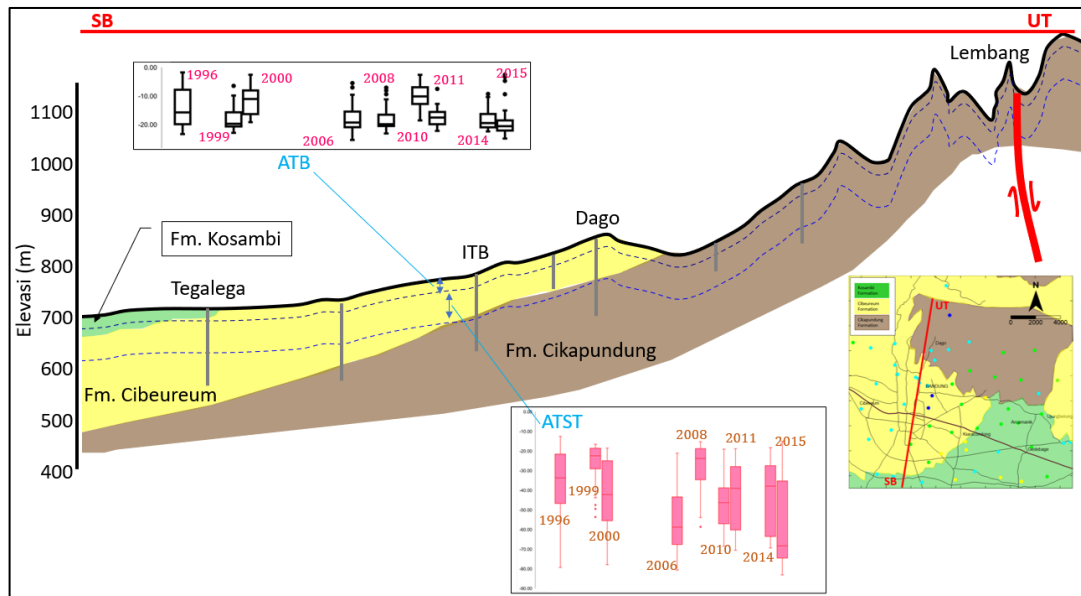
Beberapa data kedalaman sumur dan juga kedalaman menuju muka air tanah ditunjukkan pada beberapa literatur yang disarikan pada Tabel 1. Variasi spasial dari posisi muka air tanah ditunjukkan pada daerah penelitian sebagai peta-peta dapat diamati pada beberapa literatur (seperti: (Hamandi et al., 1997; Harnandi & Herawan, 2009; Nz & Iskandar, 2000; Tahta, 2019; Taufiq et al., 2018)). Terdapat dua sistem aliran airtanah berdasarkan hasil studi (Delinom & Suriadarma, 2010) dengan distribusi aliran yang relatif dangkal sebagai aliran lokal dan distribusi aliran yang lebih dalam sebagai aliran menengah. Berdasarkan beberapa publikasi pada Tabel 1, maka penyederhanaan untuk batasan pemodelan akan diatur sebagai:

1. Zona perubahan terkait air permukaan dan air tanah bebas (ATB) pada rentang 0 – 25 meter di bawah permukaan.
2. Zona perubahan terkait air tanah semi tertekan (ATST) pada rentang 25 – 100 meter di bawah permukaan.

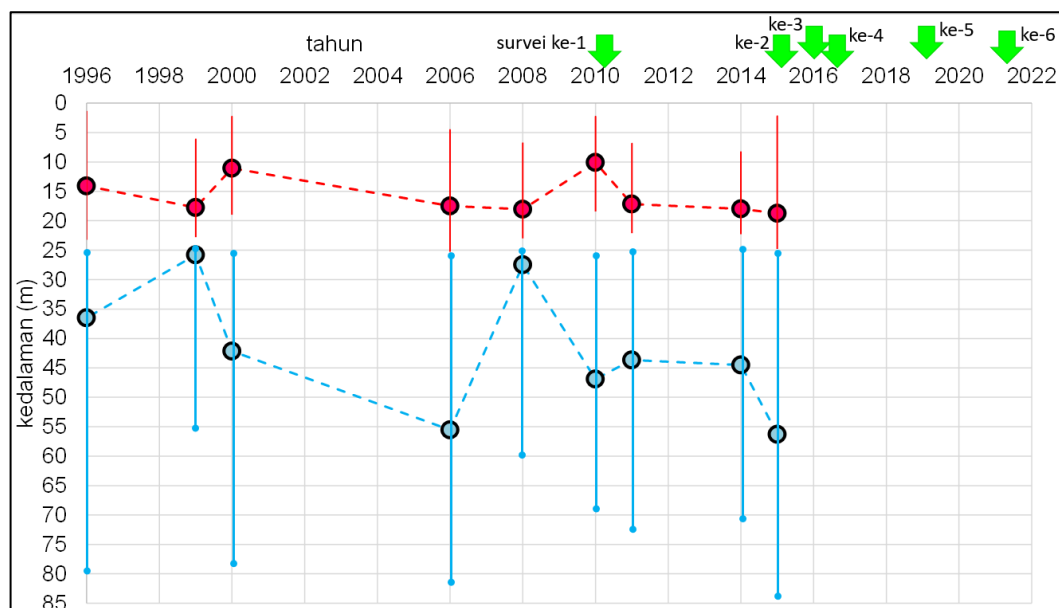
Pada studi ini, elevasi untuk permukaan digunakan data DEMNAS 2010. Variasi spasial untuk melihat trend perubahan ATB dan ATST dilakukan pada beberapa tahun (1996, 1999, 2000, 2006, 2008, 2010, 2011, 2014, dan 2015). Estimasi rata-rata sejak tahun 1996 sampai 2015 untuk kedudukan ATB dan ATST ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai rata-rata diperoleh dari 61 posisi titik di daerah penelitian dan juga dilengkapi keterangan untuk enam kegiatan akuisisi data TLM sejak tahun 2010 sampai 2021. Kecenderungan/*trend* perubahan ATB dan ATST diestimasi menggunakan data-data yang tersedia (Tabel 1).



Gambar 1 Peta TLM dengan *baseline* pengukuran pada tahun 2010



Gambar 2 Peta geologi (modifikasi dari (Taufiq et al., 2018)) dan sketsa penampang geologi SB-UT daerah penelitian berdasar Direktorat Tata Lingkungan Geologi dan Kawasan Pertambangan pada tahun 2006. Dua zona perubahan model dibatasi pada dua bagian (ATB & ATST)



Gambar 3 Trend perubahan kedalaman rata-rata ATB dan ATST berdasarkan literatur (Tabel 1), garis waktu untuk survei *microgravity* ke-1 sampai ke-6 ditunjukkan dengan panah hijau

Tabel 1 Ringkasan posisi MAT di Bandung dan sekitarnya dari studi literatur

Keterangan/Lokasi	Kedalaman Muka Airtanah	Sumber
15 kecamatan	Periode Juli 1995 - Agustus 1996 pada rentang kedalaman 2,08 – 92,14 meter.	(Hamandi et al., 1997)
144 Sumur Bor 168 Sumur Gali	Tahun Anggaran 1999/2000 pada rentang kedalaman sumur 1,2 – 256 meter.	(Ruchijat & Sukrisna, 2000)
Dayeuhkolot, Rancaekek, Majalaya, beberapa tempat di Bandung	Kedalaman maksimum berada pada rentang 13,22 – 73,52 meter.	(Satrio, 2008)
Cimahi, Dayeuhkolot, Rancaekek, Majalaya, beberapa tempat di Bandung	Kedudukan muka air tanah pada rentang kedalaman 24,73 – 100 meter	(Harnandi & Herawan, 2009)
Ciparay, Cibodas, Dago	Berdasarkan data bor, akuifer terdapat pada interval kedalaman yang bervariasi pada rentang 20 - 158 m.	(Yuningsih & Soewaeli, 2009)
Rancaekek	Perubahan kedudukan muka air tanah pada periode 1986 – 2008 berada pada rentang kedalaman 6,8 – 51,75 meter.	(Taufiq, 2011)
30 sumur monitoring DTLGKP	Perubahan kedudukan muka air tanah pada periode 1990 – 2004 berada pada rentang kedalaman 0 – 120 meter.	(UCBFM team, 2012)
77 sumur	Open data tahun 2007, 2008, dan 2009 pada rentang kedalaman sumur 60-256 meter.	(Irawan, 2016)
Peta kontur MAT	Posisi kedudukan MAT ditunjukkan dengan peta kontur elevasi.	(Aji et al., 2022; Hamandi et al., 1997; Harnandi & Herawan, 2009; Nz & Iskandar, 2000; Tahta, 2019; Taufiq et al., 2018)

METODOLOGI

Pemetaan TLM untuk pemantauan variasi hidrologi cukup umum ditemukan dalam literatur (seperti: (Chapman et al., 2008; Gehman et al., 2009; Jacob et al., 2010). Metodologi estimasi perubahan MAT menggunakan data TLM telah dikembangkan dan dideskripsikan lebih rinci pada penelitian sebelumnya (Wahyudi et al., 2023). Anomali TLM yang umumnya dipetakan sebagai perubahan densitas di bawah permukaan, pada skema perhitungan iteratif disederhanakan menjadi perhitungan untuk mendapatkan perubahan MAT (kenaikan atau penurunan MAT). Perhitungan model dengan skema iteratif merupakan pengembangan atau modifikasi dari persamaan yang umum ditemui di buku teks (Blakely, 1995) dari studi oleh (Bott, 1960) untuk interpretasi cekungan sedimen. Beberapa publikasi terbaru juga masih menggunakan pengembangan formulasi tersebut (seperti: (Chakravarthi, 1995; Wahyudi & Kadir, 2018)). Formulasi matematis yang digunakan untuk estimasi perubahan MAT menggunakan data TLM sebagai berikut:

$$dz^{(k+1)}(j) = dz^{(k)}(j) + \frac{(\Delta g_{obs}(i) - \Delta g_{cal}(i))}{RG(\rho_w \phi)}$$

.....(1)

dimana angka indeks untuk data observasi, model prisma dan iterasi ditunjukkan sebagai i , j , and k .

Konstanta universal gravitasi ditunjukkan sebagai G pada persamaan (1), sedangkan perubahan densitas ditunjukkan sebagai substitusi fluida (densitas air sebagai ρ_w) pada ruang pori (ϕ) di lapisan batuan. Untuk perubahan densitas pada ruang pori diperhitungkan cukup ekstrim dengan mengasumsikan porositas batuan 30% sebagai perubahan MAT. Skema iteratif dengan persamaan (1) akan mendapatkan update perubahan panjang model prisma dz . Batas atas dan bawah model prisma akan diikat dengan informasi MAT di daerah penelitian sehingga bersesuaian dengan kondisi pada saat waktu survey 1 dan survey 2 TLM (Δg_{obs}). Formula matematis (1) sangat umum digunakan dengan melibatkan perhitungan kedepan untuk Δg_{cal} dengan sumber benda di bawah permukaan model prisma (Pluoff, Nagy, atau Okabe). Jumlah prisma untuk mewakili daerah penelitian digunakan sebanyak 1295 buah (35×37). Konstanta R pada persamaan (1) digunakan berdasarkan performa iterasi yang efektif pada daerah penelitian. Uji coba beberapa nilai R akan memberikan perubahan nilai RMSE yang paling kecil (ilustrasi lebih detail ditunjukkan pada bagian deskripsi paragraf dengan studi pada data lapangan).

Pada skema riset ini, sebagian besar data diperoleh dengan gravimeter relatif. Akan lebih ideal jika pemetaan anomali TLM menggunakan gravimeter absolut, yang mana pada waktu

pengamatan 2010 sampai 2021 tidak tersedia cukup banyak pada riset ini. Pengamatan di Bandung dengan gravimeter absolut A-10 pada skema riset 2013 dan 2014 merupakan bagian penelitian *Japan International Cooperation Agency* (JICA) terkait CCS Pilot Project di Blora (Darmawan et al., 2019; Nishijima et al., 2015; Wahyudi et al., 2017). Pada Gambar 4 ditunjukkan dokumentasi pengamatan dengan gravimeter absolut A-10 di kampus ITB (lokasi dekat dengan gedung ITB di Program Studi Teknik Geofisika (TG) dan Teknik Geodesi (GD)) pada tahun 2014. Data pengamatan pada tahun 2013 dan 2014 tersebut dilakukan pengikatan dengan gravimeter relatif untuk pengamatan di beberapa wilayah di Jawa Barat dan Jawa Tengah seperti: Banjar, Ciamis, Cimanggu, Karangsambung, Kebasen, Kebumen, dan Malangbong (Wahyudi, Laesanpura, et al., 2021). Untuk pengikatan gravimeter relatif pada lokasi di kampus ITB dilakukan pada skema kegiatan outdoor activity (OA) praktikum mahasiswa yang dilakukan setiap tahun. Ilustrasi perbedaan data pengamatan di TG dan GD ditunjukkan pada Gambar 5 dengan trend linier dengan data CG-5 semakin meningkat sekitar $1,9 \mu\text{Gal}/\text{tahun}$ berdasar data tahun 2014 sampai 2022.

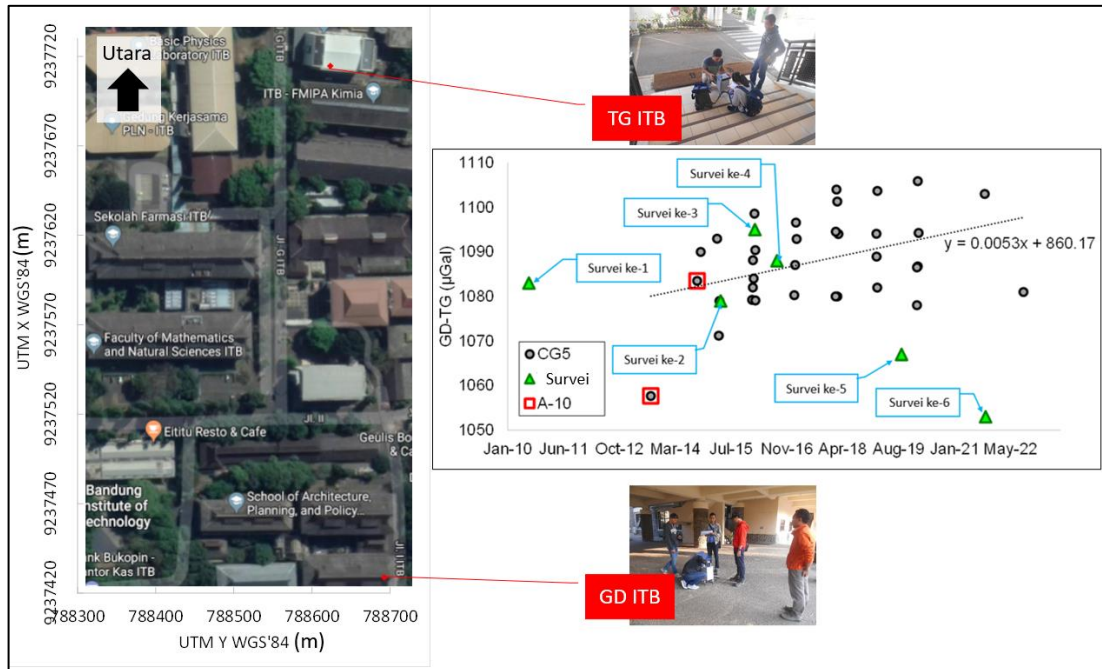
HASIL DAN PEMBAHASAN

Akuisisi data microgravity pada skema riset ini, yang pertama dan kedua dilakukan pada tahun 2010 dan 2015. Pada Gambar 3 juga telah ditunjukkan untuk dua kegiatan akuisisi microgravity relatif bersesuaian dengan ketersediaan informasi MAT di bawah permukaan. Perubahan (Δ) nilai pada estimasi MAT (disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 3) sejak 2010 sampai 2015 dapat dikorelasikan dengan anomali TLM 2015-2010 (Gambar 6).

Korelasi yang lebih tinggi (0,5351) antara anomali TLM dengan perubahan MAT ditunjukkan pada estimasi ΔATST , sedangkan korelasi yang lebih rendah (0,3018) pada estimasi ΔATB . Berdasarkan distribusi titik pengukuran gravity di daerah penelitian, interval data masih cukup jauh (antara 1-2 km). Pola anomali TLM masih menunjukkan kesesuaian dengan kecenderungan untuk zona perubahan yang sedikit lebih dalam (ATST) dibandingkan dengan zona perubahan yang lebih dangkal (ATB).



Gambar 4 Dokumentasi kegiatan akuisisi data dengan *absolute gravimeter* di ITB pada tahun 2014.



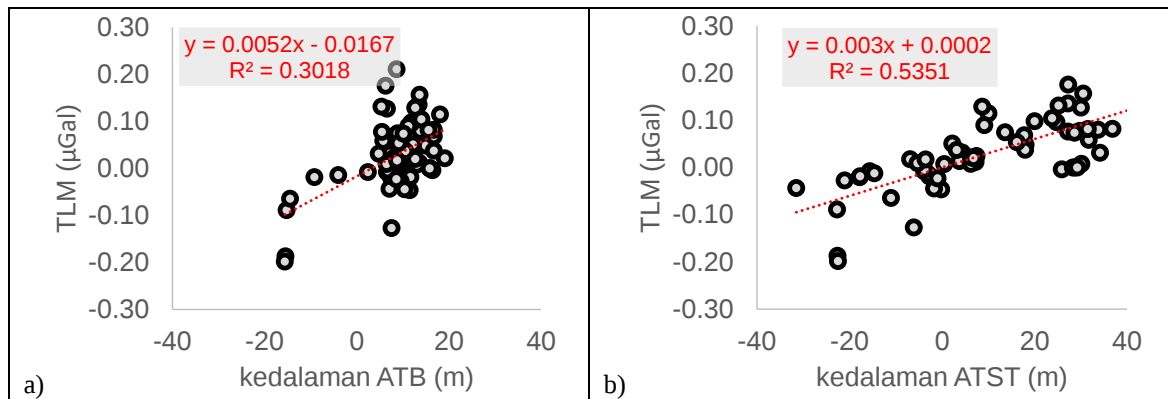
Gambar 5 Dokumentasi kegiatan akuisisi data dengan *relative gravimeter* di ITB, perbandingan data plot perbedaan bacaan CG-5 dan A-10 dilakukan juga dengan melibatkan data praktikum sejak 2010 sampai 2022.

Korelasi untuk ATB akan bisa lebih baik jika distribusi titik pengamatan cukup rapat sehingga mampu mengakomodasi variasi perubahan untuk sinyal dengan bilangan gelombang yang lebih tinggi akibat sumber perubahan densitas yang lebih dekat permukaan. Namun untuk mencakup luasan kota Bandung, jumlah titik yang diperlukan menjadi sangat banyak dan akan memerlukan waktu survei yang lebih lama. Saran untuk studi yang lebih integratif maka pada daerah penelitian bisa ditunjang dengan variasi perubahan beberapa data sumur untuk diikat dalam mendapatkan estimasi pemodelan. Data di permukaan dengan validasi data bawah permukaan akan memberikan gambaran lebih baik terkait akurasi hasil pemodelan. Akses data sumur pemantauan di beberapa lokasi di Bandung akan memberikan hasil studi yang lebih bermanfaat jika bisa digunakan oleh masyarakat lebih luas.

Beberapa perubahan pada zona ATB yang memungkinkan menjadi sumber anomali TLM dapat berkaitan dengan kompleksitas persentase

kandungan air di tanah permukaan dan amblesan. Beberapa studi terkait dengan response TLM akibat amblesan di daerah penelitian menunjukkan nilai yang cukup kecil, berkisar pada -0,65 sampai -0,85 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ (Aji et al., 2022; Hafidza, 2019; Wahyudi, Hafidza, et al., 2021). Untuk anomali TLM yang digunakan pada penelitian ini, ini tidak dikoreksi dengan amblesan karena merujuk penelitian sebelumnya yang cukup kecil. Penyederhanaan pada pekerjaan ini dilakukan pada pemodelan di zona ATB dengan memperhitungkan perubahan MAT saja pada selang waktu akuisisi *microgravity*.

Pemodelan pada zona ATST juga dilakukan sampai kedalaman 100 meter di bawah permukaan. Meskipun beberapa data sumur (Tabel 1) menunjukkan kedalaman lebih dari 100 meter, namun pada pekerjaan ini tidak dimodelkan mengingat jumlah aktivitas sumur di daerah penelitian yang cukup dalam (>100 meter) hanya dalam jumlah yang jauh lebih sedikit jika dibandingkan dengan sumur lokal yang <100 meter.



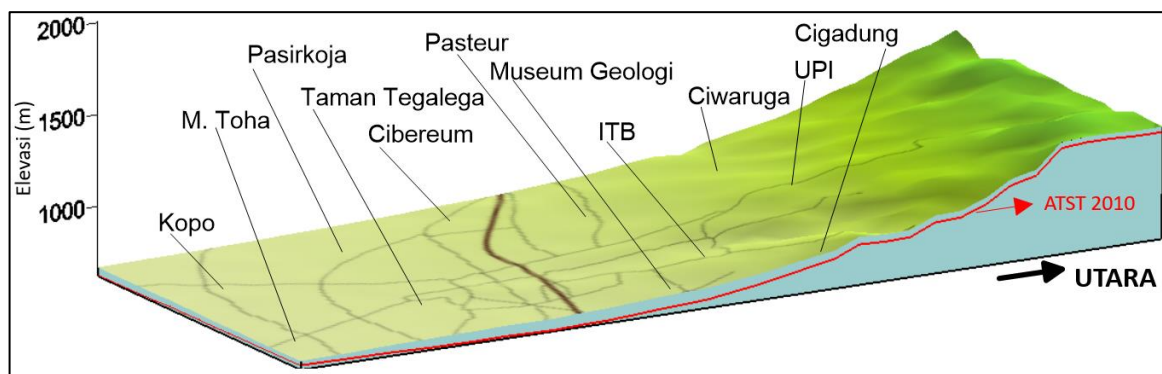
Gambar 6 Plot korelasi antara anomali TLM 2015-2010 dengan estimasi: a) Δ ATB dan b) Δ ATST.

Ilustrasi plot untuk variasi topografi dan data MAT di bagian Utara relatif lebih tinggi dibanding bagian Selatan ditunjukkan pada Gambar 7. Ilustrasi beberapa lokasi titik pengamatan ditunjukkan pada variasi topografi pada Gambar 7 (contoh daerah titik pengamatan seperti di sekitar: ITB, UPI, Cigadung, Ciwaruga, Museum Geologi, Taman Tegalega, Jalan Pasteur, Jalan M. Toha, Kopo, Pasirkoja, dan Cibereum).

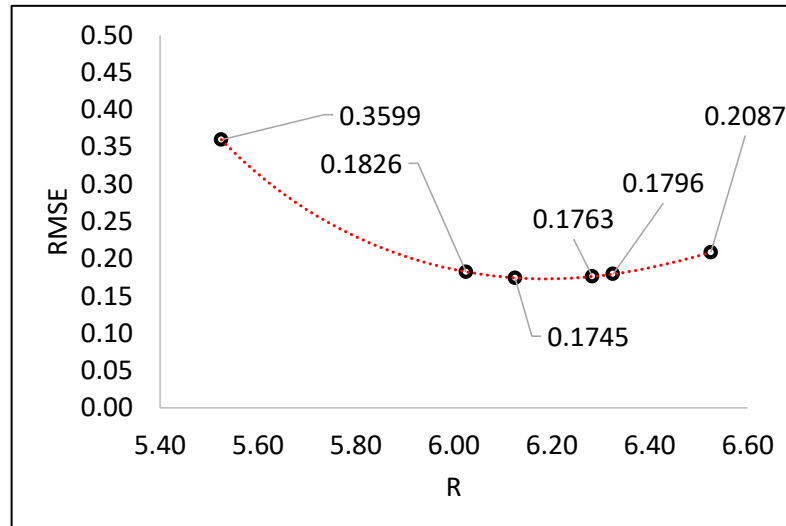
Untuk pekerjaan pada penelitian ini, berdasarkan pengujian beberapa nilai menunjukkan bahwa $R=6,125$ memberikan performa yang cukup optimal (Root-Mean Square Error (RMSE) terkecil 0,1745). Perbandingan nilai RMSE dengan beberapa konstanta R (diuji coba) ditunjukkan pada ilustrasi Gambar 8. Secara kuantitatif perhitungan dengan input TLM (Gambar 1) melibatkan 5 peta anomali TLM (56, 66, 72, 109, dan 149 bulan dari baseline 2010), RMSE hasil

perhitungan iteratif dilakukan dua tahap untuk estimasi perubahan ATST dan ATB ditunjukkan pada Tabel 2. Pada Tabel 2 bisa diperhatikan perubahan RMSE yang semakin mengecil dari pemodelan ATST dan dilengkapi dengan ATB.

Plot diskrit untuk selisih antara Δg_{obs} dan Δg_{cal} untuk penentuan perubahan ATST dan ATB ditunjukkan pada Gambar 9. Berdasarkan perhitungan secara iteratif, pada Gambar 9 terlihat area penelitian di bagian Timur Laut menjadi area yang sulit untuk diminimalkan selisih antara Δg_{obs} dan Δg_{cal} . Pada bagian Timur Laut (dikenal dengan variasi topografi terjal dan dekat Gunung Manglayang), sebaran titik TLM relatif tidak ada (belum dilakukan). Hal ini menjadi catatan terkait hasil pemodelan di area Timur Laut merupakan extrapolasi dan belum ada data untuk bisa menjadi pemodelan atau estimasi yang lebih akurat.



Gambar 7 Ilustrasi daerah penelitian dengan variasi topografi dan posisi MAT yang relatif lebih tinggi di bagian Utara dibanding daerah bagian Selatan



Gambar 8 Perbandingan nilai RMSE dari pengujian beberapa konstanta R di daerah penelitian sehingga diperoleh 0,1745 sebagai RMSE terkecil dengan menggunakan R=6,125

Tabel 2 RMSE hasil perhitungan iteratif dengan input TLM baseline 2010

Input TLM	ATST	ATB
56 bulan	0,1745	0,0051
66 bulan	0,0435	0,0009
72 bulan	0,0400	0,0007
109 bulan	0,1330	0,0033
149 bulan	0,0920	0,0018

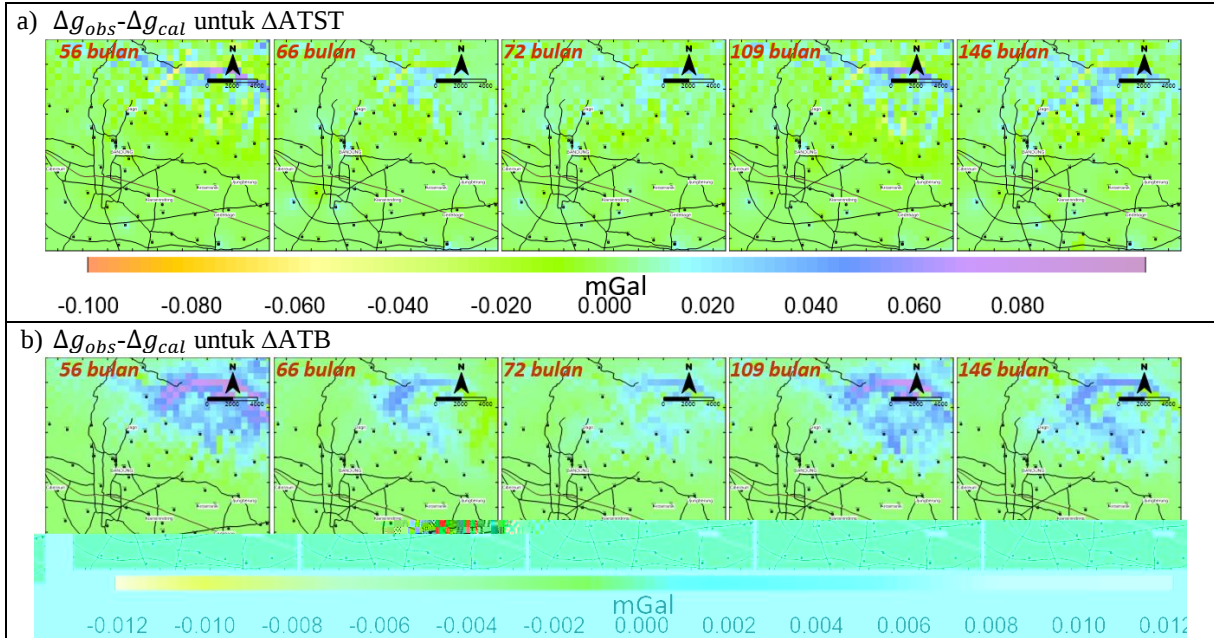
HASIL PEMBAHASAN

Hasil pemodelan (Gambar 10) ditunjukkan sebagai peta kontur perubahan MAT dari posisi MAT 2010. Berdasarkan hasil pemodelan (Gambar 10), perubahan dari posisi tahun 2010 untuk ATST dan ATB secara berturut-turut adalah pada rentang ± 23 meter dan ± 8 meter. Catatan terkait distribusi titik pengamatan serta selisih antara Δg_{obs} dan Δg_{cal} di area Timur Laut daerah penelitian memberikat hasil estimasi atau pemodelan yang tidak terlalu akurat, sehingga hasil pemodelan ATB dibagian Timur Laut yang cukup besar (sekitar ± 8 meter) perlu kita analisis lebih teliti. Rata-rata perubahan MAT di sekitar titik pengamatan

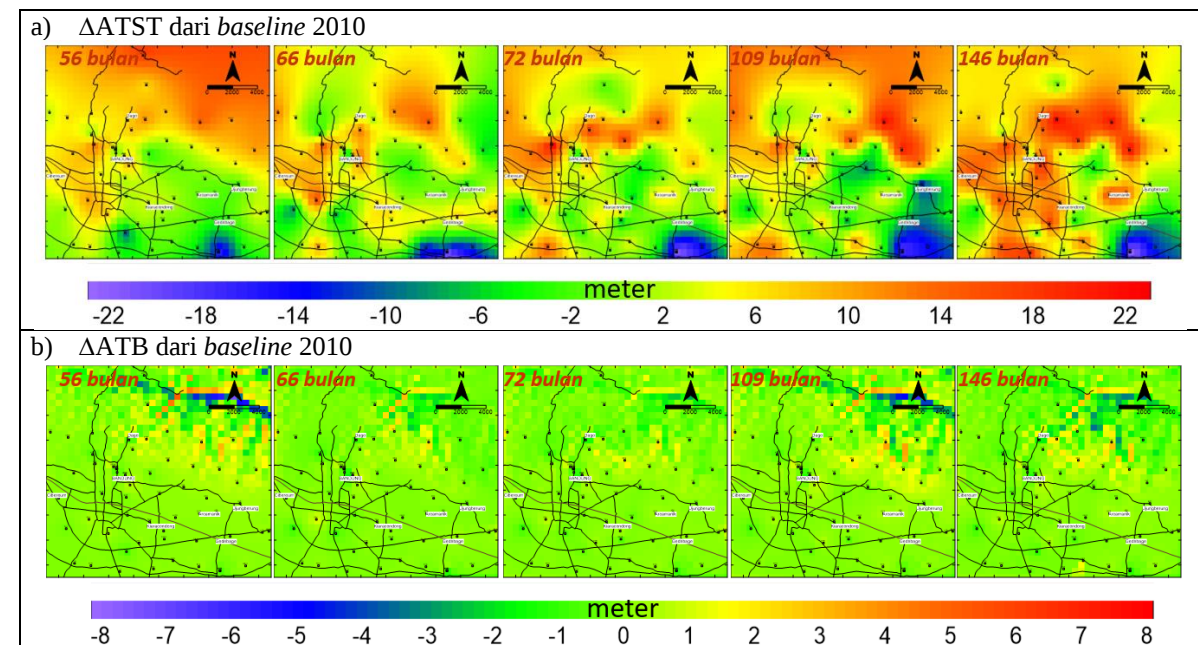
memberikan estimasi perubahan yang lebih kecil dibanding kondisi baseline tahun 2010.

Untuk pemetaan grid, hasil pemodelan pada diskritisasi 1295 prisma memberikan statistik sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 3. Variasi perubahan MAT dari tahun 2010, selanjutnya ditunjukkan pada dua penampang S-U dan B-T (Gambar 11 dan Gambar 12). Jika diperhatikan variasi perubahan di sekitar zona ATB penampang S-U dan B-T cenderung berada pada rentang perubahan ± 3 meter dari posisi baseline tahun 2010. Zona ATB di wilayah Lembang (PLBG) dan wilayah sekitar Pasir Impun diperoleh hasil perubahan yang cukup dalam (berdasar Gambar 11 dan 12).

Pada Gambar 11 perubahan MAT zona ATST yang cukup dalam ditunjukkan pada bagian tengah daerah penelitian. Penampang S-U (Gambar 11) menunjukkan wilayah dengan estimasi perubahan MAT yang cukup dalam terjadi di sekitar Cikutra (TMP) sampai Dago Pakar (DPW). Pada Gambar 12 (penampang B-T) dapat terlihat di area bagian tengah juga cukup dalam estimasi perubahan MAT zona ATST di wilayah sekitar GOR Pajajaran (GOR) sampai Cicaheum (CIC).



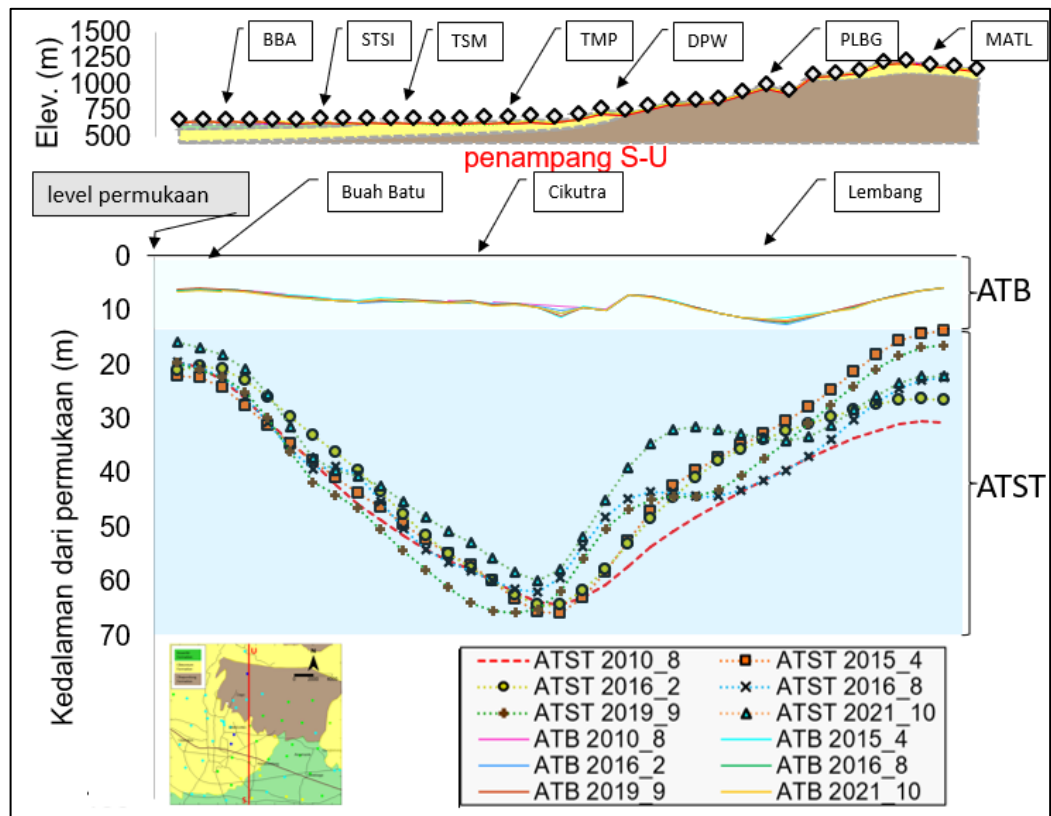
Gambar 9 Plot selisih antara Δg_{obs} dan Δg_{cal} untuk penentuan perubahan: a) ATST dan b) ATB



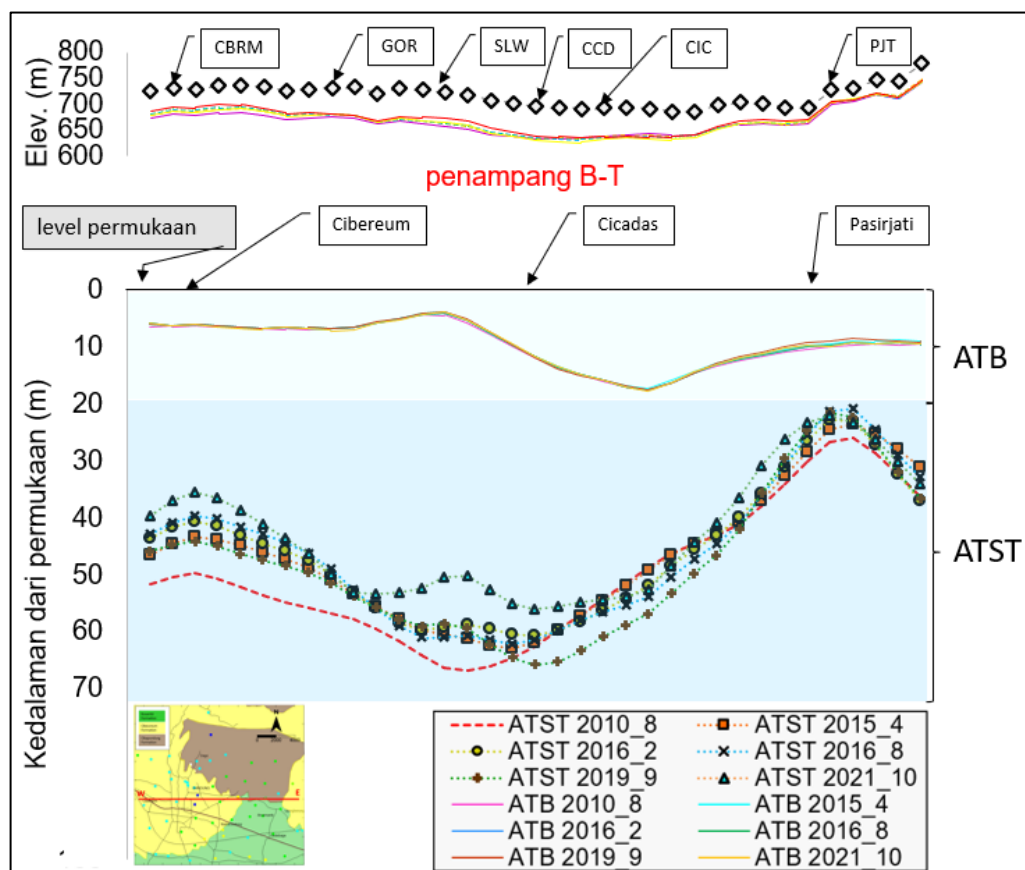
Gambar 10 Peta Kontur perubahan MAT dari kedudukan tahun 2010 pada daerah penelitian berdasarkan hasil pemodelan: a) ATST dan b) ATB

Tabel 3 Statistik hasil pemodelan pada 1295 prisma segi-empat untuk perubahan MAT dari 2010

Input	$\Delta ATST$ from 2010 (m)			ΔATB from 2010 (m)		
	min.	max.	avg.	min.	max.	avg.
56 bulan	-16,09	17,31	5,45	-7,34	5,04	0,11
66 bulan	-20,57	14,85	2,55	-2,26	2,83	-0,03
72 bulan	-21,39	21,95	3,72	-2,63	2,06	0,01
109 bulan	-17,12	21,55	4,63	-5,91	3,97	0,09
149 bulan	-22,42	21,59	6,19	-3,42	2,93	-0,07



Gambar 11 Plot hasil pemodelan perubahan MAT pada penampang S-U daerah penelitian



Gambar 12 Plot hasil pemodelan perubahan MAT pada penampang B-T daerah penelitian

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah ditunjukkan rangkuman terkait studi TLM (*time-lapse microgravity*) di Kota Bandung. Upaya pemodelan dilakukan pada lima peta *time-lapse microgravity* dengan *baseline* survey 2010. Upaya pemodelan anomali *time-lapse microgravity* dilakukan dengan menggunakan muka airtanah tahun 2010 dan diperoleh estimasi dan variasi muka airtanah di bawah permukaan. Perubahan muka airtanah dari tahun 2010-2021 untuk airtanah semi tertekan (ATST) dan air tanah bebas (ATB) dari pemodelan memberikan estimasi secara berturut-turut pada rentang ± 23 meter dan ± 8 meter. Berdasarkan penampang hasil pemodelan, estimasi perubahan di zona air tanah bebas (ATB) hanya mencapai kisaran ± 8 meter. Akurasi dari hasil pemodelan perlu diperhatikan terutama pada sekitar titik pengamatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan atas dukungan dari Teknik Geofisika FTSM ITB melalui skema penelitian KK, P3MI, dan PPMI. Penulis juga menyampaikan terimakasih untuk seluruh tim survey TLM pada tahun 2010, 2015, 2016, 2019, dan 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, W., Wahyudi, E. J., Simanjuntak, S. D., & Belia, S. (2022). Simple Forward Calculation Study for Anomaly Response Simulation and Geomagnetic Data Transformation in Karangsambung Area. *Journal of Physics: Conference Series*, 2243(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2243/1/012030>
- Blakely, R. J. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/cbo9780511549816>
- Bott, M. H. P. (1960). The use of Rapid Digital Computing Methods for Direct Gravity Interpretation of Sedimentary Basins. *Geophysical Journal International*, 3(1), 63–67. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1960.tb00065.x>
- Chakravarthi, V. (1995). Modelling of density interface with binomial density variation. *Journal of Applied Geophysics*, 34(1), 69–74. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)00048-S](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)00048-S)
- Chapman, D. S., Sahm, E., & Gettings, P. (2008). Monitoring aquifer recharge using repeated high-precision gravity measurements: A pilot study in South Weber, Utah. *Geophysics*, 73(6), WA83–WA93. <https://doi.org/10.1190/1.2992507>
- Darmawan, N., Wahyudi, E. J., Kadir, W. G. A., & Sule, R. (2019). Processing and data analysis of time-lapse microgravity due to ground water level changing in baseline stage of CO2 injection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 318(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/318/1/012020>
- Delinom, R. M., & Suriadarma, A. (2010). Groundwater Flow System of Bandung Basin Based on Hydraulic Head, Subsurface Temperature, and Stable Isotopes. *Riset Geologi Dan Pertambangan*, 19(2), 55–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.14203/risetgeotam2010.v20.34>
- Gehman, C. L., Harry, D. L., Sanford, W. E., Stednick, J. D., & Beckman, N. A. (2009). Estimating specific yield and storage change in an unconfined aquifer using temporal gravity surveys. *Water Resources Research*, 45(4). <https://doi.org/10.1029/2007WR006096>
- Hafidza, M. H. (2019). *Studi pemodelan time-lapse microgravity dari redistribusi densitas dengan data pengukuran elevasi menggunakan alat GPS geodetik di daerah Bandung* [Skripsi]. ITB.
- Hamandi, D., Iskandar, N., & Arief, S. (1997). Konservasi Air Tanah di Daerah Bandung dan Sekitarnya. *Buletin Geologi Tata Lingkungan*, 20(1), 10–30. <https://doi.org/10.2006/jlbg.v16041.57>
- Harnandi, D., & Herawan, W. (2009). Pemulihan Air Tanah Berdasarkan Kajian Hidrogeologi di Cekungan Air Tanah Bandung – Soreang. *Jurnal Sumber Daya Air*, 5(1), 43–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.32679/jsda.v5i1.461>
- Hendarmawan. (2002). Unconfined Aquifer System of Volcanics in the Northern Part of Bandung Basin, West Java, Indonesia. In *Journal of Geosciences* (Vol. 45).
- Hutasoit, L. M. (2009). Kondisi Permukaan Air Tanah dengan dan tanpa peresapan buatan di daerah Bandung: Hasil Simulasi Numerik. In *Jurnal Geologi Indonesia* (Vol. 4, Issue 3).
- Irawan, D. E. (2016). *Final report: Groundwater open data map for Bandung area. (2nd December 2016)*. Authorea.
- Jacob, T., Bayer, R., Chery, J., & Le Moigne, N. (2010). Time-lapse microgravity surveys reveal water storage heterogeneity of a karst aquifer.

- Journal of Geophysical Research*, 115(B6), B06402.
<https://doi.org/10.1029/2009JB006616>
- Nishijima, J., Fukuda, Y., Sofyan, Y., Itakura, M., Wahyudi, E. J., & Matsuoka, T. (2015). Repeat micro-gravity measurements using A10 absolute gravimeter for CO₂ injection monitoring in Gundih gas field, Central Java, Indonesia. *Proceedings of the 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, Japan, 18-20 November 2015*, 177–180.
<https://doi.org/10.1190/segj122015-061>
- Nurliana, L., & Eko Widodo, L. (2009). Potensi Imbuhan dan Imbuhan Airtanah Cekungan Airtanah Bandung. *JTM*, XVI(4), 261–268.
<https://osf.io/fqkh4/download>
- Nz, A. T., & Iskandar, N. (2000). *Peta Pengendalian Pengambilan Airtanah. Direktorat Geologi Tata Lingkungan*. Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
<https://geologi.esdm.go.id/petalist>
- Ruchijat, S., & Sukrisna. (2000). *Penyelidikan Potensi Cekungan Airtanah Daerah Bandung, Jawa Barat (Laporan 28/LAP/PHPA/99)*.
<https://pag.geologi.esdm.go.id/files/PENILA-1>
- Satrio. (2008). *Dinamika Air Tanah dan Inter Relasinya dengan Air Sungai di Cekungan Bandung*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.12962/j25983806.v9.i1.143>
- Sunarwan, B. (2011). Penentuan Satuan Hidrostratigrafi (HSU) di Daerah Vulkanik (Studi Kasus: Daerah Cekungan Bandung). *Jurnal Teknik | Majalah Ilmiah Fakultas Teknik UNPAK*, 12(2), 44–56.
<https://doi.org/10.33751/teknik.v12i2.860>
- Sunarwan, B., Irawan, D. E., Puradimaja D. J., & Notosiswoyo, S. (2013). Perubahan Karakter Isotop 2H dan 18O Air Tanah pada Akuifer Dangkal di CAT Bandung-Soreang. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Nuklir*, 61–67.
- Tahta, M. A. (2019). *Studi pemodelan time-lapse microgravity menggunakan data perubahan muka air tanah di Daerah Bandung*. ITB.
- Taufiq, A. (2011). *(Ground) Water Resources Conservation in Bandung Basin by Redevelop Dry Well into Recharge Well*. Research Center of Water Resource.
- Taufiq, A., Hosono, T., Ide, K., Kagabu, M., Iskandar, I., Effendi, A. J., Hutasoit, L. M., & Shimada, J. (2018). Impact of excessive groundwater pumping on rejuvenation processes in the Bandung basin (Indonesia) as determined by hydrogeochemistry and modeling. *Hydrogeology Journal*, 26(4), 1263–1279.
<https://doi.org/10.1007/s10040-017-1696-8>
- UCBFM team. (2012). *Upper Citarum Basin Flood Management: Flood Management Strategy*.
<http://citarum.org/citarum-knowledge/arsip-dokumen/laporan-rutin-icwrmip/bantuan-teknis/ta-c1-upper-citarum-basin-flood-management/891-ucbfm-1-volume-report-1d2d-studies-strategic-management-strategy-15122011/file.html>
- Wahyudi, E. J., Hafidza, M. H., & Tahta, M. A. (2021). Simple design to estimate time-lapse microgravity response due to shallow subsurface density redistribution caused by land subsidence. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 873(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/873/1/012040>
- Wahyudi, E. J., & Kadir, W. G. A. (2018). Inverse Modeling of Gravity Data with Two Layers Density in Sedimentary Basin Structure. *Journal of Physics: Conference Series*, 1090(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1090/1/012048>
- Wahyudi, E. J., Laesanpura, A., & Sukmayadi, D. (2021). Gravity observation of field camp geophysics in Karangsambung using Data Acquisition 2005-2019. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 873(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/873/1/012049>
- Wahyudi, E. J., Marthen, R., Fukuda, Y., & Nurali, Y. (2017). Time-lapse microgravity data acquisition in baseline stage of CO₂ injection Gundih pilot project. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 62(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/62/1/012047>
- Wahyudi, E. J., Setianingsih, Irawan, D. E., & Sule, R. M. (2023). Numerical Example to Estimate Groundwater Level Changes using Time-lapse Microgravity Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1227(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1227/1/012015>
- Yuningsih, S. M., & Soewaeli, A. S. (2009). Menentukan Kedalaman dan Ketebalan Akuifer dengan Metode Logging Tahanan Jenis pada Waktu Pengeboran Air Tanah. *Jurnal Sumber Daya Air*, 5(1), 27–42.
<https://doi.org/https://doi.org/10.32679/jsda.v5i1.460>