

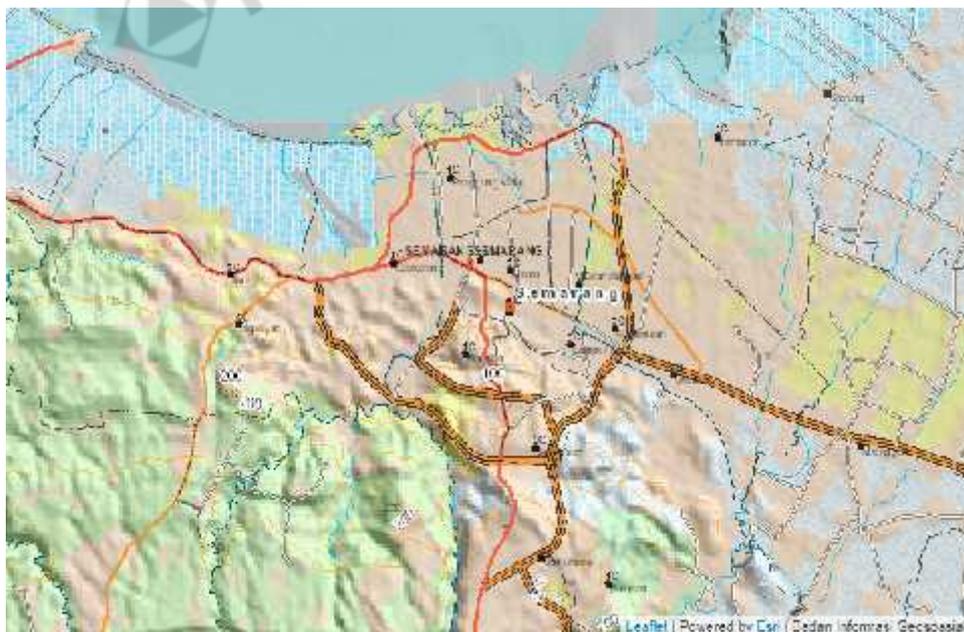
## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Karakteristik Daerah Semarang

##### 2.1.1. Kondisi Geografis

Kota Semarang merupakan ibu kota Provinsi Jawa Tengah yang dapat digolongkan sebagai kota metropolitan. Sebagai ibukota Provinsi, maka Kota Semarang menjadi parameter kemajuan kota-kota lain di Propinsi Jawa Tengah. Secara geografis wilayah Kota Semarang berada antara 6°50'-7°10' LS dan 109°35' - 110°50' BT dengan luas wilayah 373,70 Km<sup>2</sup> dengan batas-batas antara lain di sebelah Barat berbatasan dengan Kabupaten Kendal, sebelah Timur berbatasan dengan Kabupaten Demak, sebelah selatan berbatasan dengan Kabupaten Semarang, dan di sebelah Utara berbatasan langsung dengan Laut Jawa. Kota Semarang mempunyai jumlah penduduk lebih dari 1,7 juta jiwa dan pada siang hari bisa mencapai 2 juta jiwa (BPS Kota Semarang, 2017).



**Gambar 2.1** Visualisasi wilayah Semarang (BIG, 2019)

### 2.1.2. Kondisi Demografis

Kota Semarang terbagi atas 16 kecamatan, jumlah penduduk Kota Semarang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Jumlah Penduduk Kota Semarang (Disdukcapil Kota Semarang, 2018)

No	Kecamatan	Jenis Kelamin		Total (jiwa)
		Laki-laki	Perempuan	
1	Semarang Tengah	29,322	31,751	61,073
2	Semarang Barat	78,337	80,681	159,018
3	Semarang Utara	61,938	63,857	125,795
4	Semarang Timur	35,647	37,844	73,491
5	Gayamsari	36,732	37,222	73,954
6	Gajah Mungkur	29,639	30,507	60,146
7	Genuk	57,300	56,952	114,252
8	Pedurungan	95,788	97,010	192,798
9	Candisari	39,576	40,914	80,490
10	Banyumanik	69,203	70,724	139,927
11	Gunungpati	47,035	46,831	93,866
12	Tembalang	89,058	89,772	178,830
13	Tugu	16,776	16,690	33,466
14	Ngaliyan	69,032	69,586	138,618
15	Mijen	36,754	36,725	73,479
16	Semarang Selatan	33,827	35,548	69,375
<b>Total</b>		<b>825,964</b>	<b>842,614</b>	<b>1,668,578</b>

Sebagai salah satu Kota metropolitan Semarang boleh dikatakan cukup padat. Jumlah penduduk Kota Semarang berdasarkan hasil sensus penduduk pada tahun 2018 sebanyak 1.668.578 jiwa terdiri dari 852.946 laki-laki (49,55 persen) dan 842.614 perempuan (50,45 persen). Jumlah penduduk ini naik sebanyak 20.299 orang atau sekitar 1,52 persen dalam kurun waktu empat tahun dari tahun

2014. Selama tahun 2014 terdapat 1.762.410 orang. Dengan luas wilayah Kota Semarang mencapai 373,7 ha sedangkan jumlah penduduk sebanyak 1,67 juta jiwa. Artinya, kepadatan penduduk kota tersebut sebesar 4,780 per km persegi. Proyeksi penduduk Kota Semarang dapat dilihat dalam Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Proyeksi penduduk Kota Semarang (Disdukcapil Kota Semarang, 2018)

Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa)		
	Laki-laki	Perempuan	Total
2014	879,473	882,937	1,762,410
2015	881,493	885,593	1,767,086
2016	808,348	821,343	1,629,691
2017	818,061	830,218	1,648,279
2018	825,964	842,614	1,668,578

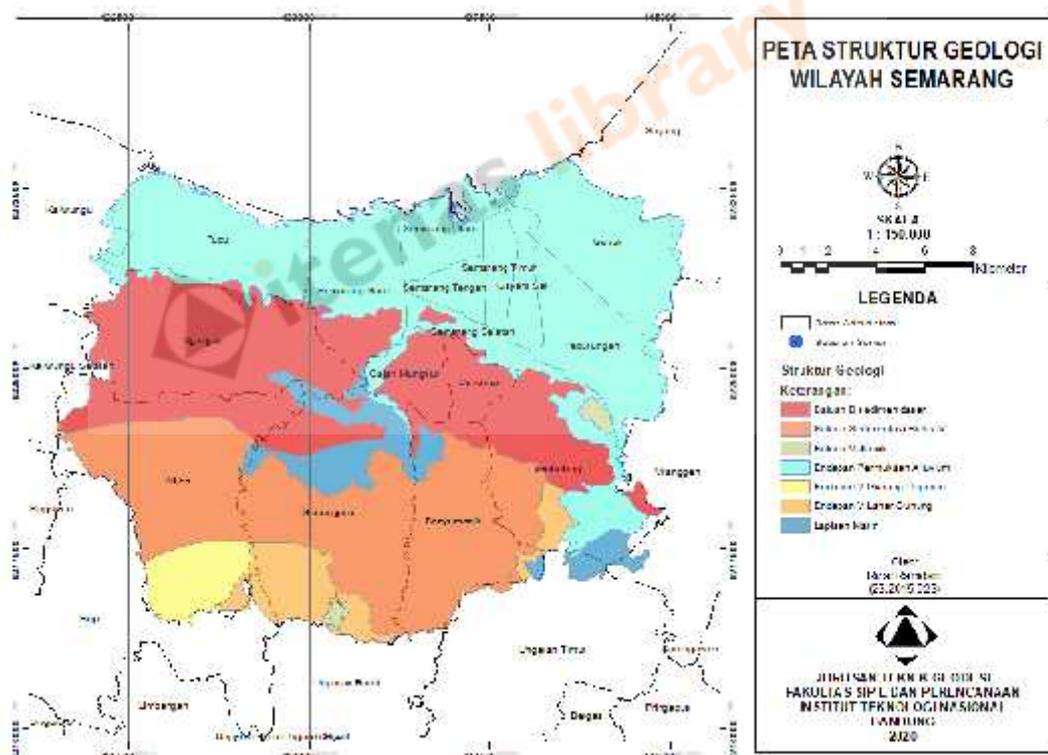
### 2.1.3. Geomorfologi

Kota Semarang terbagi menjadi dua yaitu daerah dataran rendah (Kota Bawah) dan daerah perbukitan (Kota Atas). Kota bawah merupakan pusat kegiatan pemerintahan, perdagangan dan industri sedangkan kota atas lebih banyak dimanfaatkan untuk perkebunan, persawahan, hutan. Sedangkan ciri masyarakatnya juga terbagi dua yaitu masyarakat dengan karakteristik perkotaan yang menempati daerah sekitar pusat kota dengan lingkungan pemukiman yang bercirikan perkotaan dan masyarakat dengan karakteristik pedesaan yang menempati daerah perluasan/pinggiran dengan kondisi yang lebih tradisional. Wilayah Kabupaten Demak termasuk dalam kategori topografi datar dan terdiri atas dataran rendah, pantai serta perbukitan, dengan ketinggian permukaan antara 0-100 meter. Kemiringan lahan di Kabupaten Demak sebagian besar relatif datar, yaitu berada pada lahan dengan kemiringan 0-8 %. Sedangkan pada bagian selatan Kabupaten Demak memiliki kemiringan lahan yang sangat bervariasi

### 2.1.4. Struktur Geologi

Struktur Geologi wilayah Semarang terdiri dari struktur aluvium, batuan gunung api kemalon dan sangku, batuan gunung api kaligesik, formasi jangkong, formasi kaligetas, formasi damar, formasi kalibeng, formasi kerek, serta beberapa sesar yang terbentuk karena aktifitas tektonik (Poedjoprajitno, Wahyudiono, & Cita, 2008)

Daerah Semarang sebagian besar tertutup oleh Formasi Damar yang berumur Plistosen dan sepanjang pantai utara oleh endapan aluvium. Menurut Van Bemmelen (1970), Formasi Damar tersusun atas batupasir tufan, konglomerat, dan breksi gunung api. Batupasir tersusun atas mineral gelap, felspar, dan kuarsa, serta sisa-sisa vertebrata. Selain itu juga menyebutkan adanya sesar di selatan Semarang sebagai akibat runtuhnya Gunung Ungaran pada Plistosen Akhir.



**Gambar 2.2** Peta Geologi Daerah Semarang  
(Modifikasi dari: Pusat Survey Geologi, 2008)

### 2.1.5. Kondisi Geohidrologi

Potensi air di Kota Semarang bersumber pada sungai - sungai yang mengalir di Kota Semarang antara lain Kali Garang, Kali Pengkol, Kali Kreo, Kali Banjirkanal Timur, Kali Babon, Kali Sringin, Kali Kripik, Kali Dungadem dan lain sebagainya. Kali Garang yang bermata air di gunung Ungaran, alur sungainya memanjang ke arah Utara hingga mencapai Pegandan tepatnya di Tugu Soeharto, bertemu dengan aliran kali Kreo dan kali Kripik. Kali Garang sebagai sungai utama pembentuk kota bawah yang mengalir membelah lembah-lembah Gunung Ungaran mengikuti alur yang berbelok-belok dengan aliran yang cukup deras. Setelah diadakan pengukuran debit Kali Garang mempunyai debit 53,0 % dari debit total dan kali Kreo 34,7 % selanjutnya kali Kripik 12,3 %. Oleh karena kali Garang memberikan airnya yang cukup dominan bagi kota Semarang, maka langkah-langkah untuk menjaga kelestariannya juga terus dilakukan. Karena kali Garang digunakan untuk memenuhi kebutuhan air minum warga kota Semarang (Wisnarini & Ningsih, 2010).

## 2.2 Teori Penurunan Muka Tanah

Penurunan tanah dapat didefinisikan turunnya elevasi permukaan tanah terhadap bidang referensi yang dianggap stabil. Penurunan tanah alami terjadi secara regional yaitu meliputi daerah yang luas atau terjadi secara lokal yaitu hanya sebagian kecil permukaan tanah (Whittaker dan Reddish, 1989). Penurunan muka tanah (*land subsidence*) dapat juga didefinisikan sebagai penurunan tanah relatif terhadap suatu bidang referensi tertentu yang dianggap stabil. Penurunan muka tanah dapat terjadi secara perlahan, atau juga terjadi secara mendadak. Penurunan tanah adalah salah satu bagian dari deformasi. Beberapa kejadian penurunan muka tanah berkisar dalam beberapa sentimeter per tahun. Perubahan muka tanah yang bersifat mendadak biasanya diikuti dengan perubahan fisik yang nyata dan dapat diketahui secara langsung besar dan kecepatan penurunannya. Namun untuk penurunan muka tanah yang bersifat secara perlahan diketahui setelah kejadian yang berlangsung lama, besar penurunannya bisa ditentukan dengan mekanisme secara periodik (Kurniawan, 2013). Penurunan muka tanah

dapat terjadi karena proses alami, pengambilan air tanah yang berlebihan serta beban bangunan yang besar.

### 2.2.1. Penurunan Muka Tanah Alami

Penurunan muka tanah alami (*natural subsidence*) dapat terjadi pada wilayah regional maupun yang lebih luas. Secara umum, penurunan muka tanah alami dibagi menjadi:

#### 1. Siklus geologi

Penurunan tanah akibat siklus geologi, yaitu karena proses pelapukan (*denudation*), pengendapan (*deposition*), dan pergerakan kerak bumi (*crustal movement*). Proses pelapukan disebabkan oleh air terhadap batuan melalui erosi secara mekanis ataupun kimia, perubahan temperatur yang mengakibatkan pelapukan batuan, erosi akibat angin, dan proses abrasi yang terjadi pada daerah pantai. Proses pengendapan terjadi karena aliran air atau angin, sehingga menyebabkan pengendapan. Akumulasi dari endapan dengan disertai pelapukan mempengaruhi keseimbangan tekanan batuan, sehingga menyebabkan pergerakan vertikal dari lapisan tanah secara penurunan ataupun kenaikan. Pergerakan horisontal juga memungkinkan untuk terjadi (Yulaikhah, Abidin, & Murdohardono, 2001).

#### 2. Sedimentasi daerah cekungan

Daerah cekungan seringkali bisa ditemukan pada daerah tektonik lempeng, khususnya di sekitar perbatasan lempeng. Pada jangka waktu yang lama, sedimen akan mulai menumpuk di daerah cekungan dalam yang berimbas pada meningkatnya beban dari sedimen dan menyebabkan terjadinya penurunan muka tanah karena proses kompaksi sedimen. Sebagian besar penurunan muka tanah akibat faktor sedimentasi ini adalah gaya berat dari beban yang ditimbulkan oleh endapan ditambah juga dengan air dapat menyebabkan kelenturan pada lapisan kerak bumi. Selain itu ada juga aktivitas internal yang menyebabkan naiknya temperatur kerak bumi yang kemudian mengembang mengakibatkan

kenaikan pada permukaan muka tanah dan setelah itu proses erosi dan pendinginan menyebabkan penurunan muka tanah.

3. Rongga di bawah tanah (*reservoir deflection*)

Faktor ini seringkali terjadi pada daerah berkapur atau tanah yang mengandung batu kapur. Rongga bawah tanah pada daerah tersebut terbentuk karena adanya aliran air dalam tanah diiringi dengan lemahnya struktur batuan pada lapisan tanah sehingga dapat terjadi penurunan muka tanah karena keruntuhan material tanah.

4. Pergerakan tektonik dan vulkanik

Pergerakan kerak bumi atau lempeng tektonik yang saling bertumbukan di satu sisi menyebabkan penurunan muka tanah di suatu daerah dan juga menyebabkan kenaikan muka air tanah di daerah lainnya. Pergerakan tektonik ini dapat terjadi terus menerus dan mengakibatkan penurunan muka tanah dalam fraksi milimeter sampai centimeter per tahun. Tekanan yang ditimbulkan oleh aktivitas magma selain menyebabkan kenaikan permukaan tanah juga menyebabkan penurunan muka tanah tergantung kondisi struktur geologi yang ada.

### **2.2.2. Penurunan Tanah Akibat Pengambilan Air Tanah**

Pengambilan air tanah secara besar-besaran yang melebihi kemampuan pengambilannya akan mengakibatkan berkurangnya jumlah air tanah pada suatu lapisan akuifer. Hilangnya air tanah ini menyebabkan terjadinya kekosongan pori-pori tanah sehingga tekanan hidrostatis di bawah permukaan tanah berkurang sebesar hilangnya air tanah tersebut. Besarnya kompaksi pada sistem akuifer bergantung padabesar penambahan tegangan efektif, ukuran butir, kadar lempung, dan koefisien indeks penampatan (Yulaikhah, Abidin, & Murdohardono, 2001). Hal ini akan menyebabkan turunnya permukaan tanah di daerah tersebut.

### 2.2.3. Penurunan Tanah Akibat Beban Bangunan

Bangunan di atas permukaan tanah memberikan beban tambahan untuk tanah. Beban ini dapat menyebabkan pemampatan lapisan tanah. Pemampatan disebabkan oleh deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari pori-pori tanah, dan penyebab dari sifat tanah (Braja, 1999). Proses pemampatan kemudian menyebabkan terjadinya penurunan muka tanah. Secara umum penurunan tanah akibat pembebanan dapat dibagi ke dalam dua jenis, yaitu:

- a. Penurunan konsolidasi merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori air tanah.
- b. Penurunan mendadak merupakan penurunan tanah akibat dari deformasi elastik tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air.

### 2.2.4. Dampak Penurunan Muka Tanah

Penurunan muka tanah dapat mempengaruhi segala aktivitas yang terjadi di permukaan baik pada manusia maupun infrastruktur yang ada. Penurunan muka tanah mempunyai dampak secara langsung maupun tidak langsung pada suatu wilayah (Viets, 2010). Dampak penurunan muka tanah secara langsung dapat berupa penurunan muka tanah secara vertikal, kerusakan infrastruktur bangunan, dan deformasi lapisan bawah tanah. Sedangkan dampak penurunan tanah secara tidak langsung diantaranya adalah terjadinya perubahan aliran sungai, salinitasi air tanah, mengurangnya kapasitas air tanah, banjir rob, dan meningkatkan terjadinya banjir. Untuk itu informasi mengenai penurunan muka tanah yang terjadi menjadi suatu hal yang sangat penting mengingat dampak dan kerugian yang ditimbulkan. Informasi mengenai penurunan muka tanah dapat dijadikan dasar dalam suatu perencanaan pembangunan dan tata ruang, pengendalian dalam pengambilan air tanah, maupun untuk keperluan mitigasi bencana.

### **2.2.5. Metode Pengamatan Penurunan Muka Tanah**

Fenomena penurunan muka tanah tergolong suatu aktivitas yang sangat lambat dan nilai perubahannya sangatlah kecil atau dalam fraksi milimeter. Maka dibutuhkan suatu metode pemantauan yang memiliki nilai ketelitian hingga fraksi millimeter agar dapat terlihat nilai penurunan tanah serta arah vektor dari penurunan muka tanah tersebut. Penurunan muka tanah yang terjadi di suatu wilayah dapat diketahui menggunakan beberapa metode. Dalam memantau penurunan muka tanah, ada beberapa metode yang dapat digunakan diantaranya survei sipat datar (levelling), Inerferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) dan Survei GPS (Abidin, 2006).

## **2.3. Penggunaan Air Tanah**

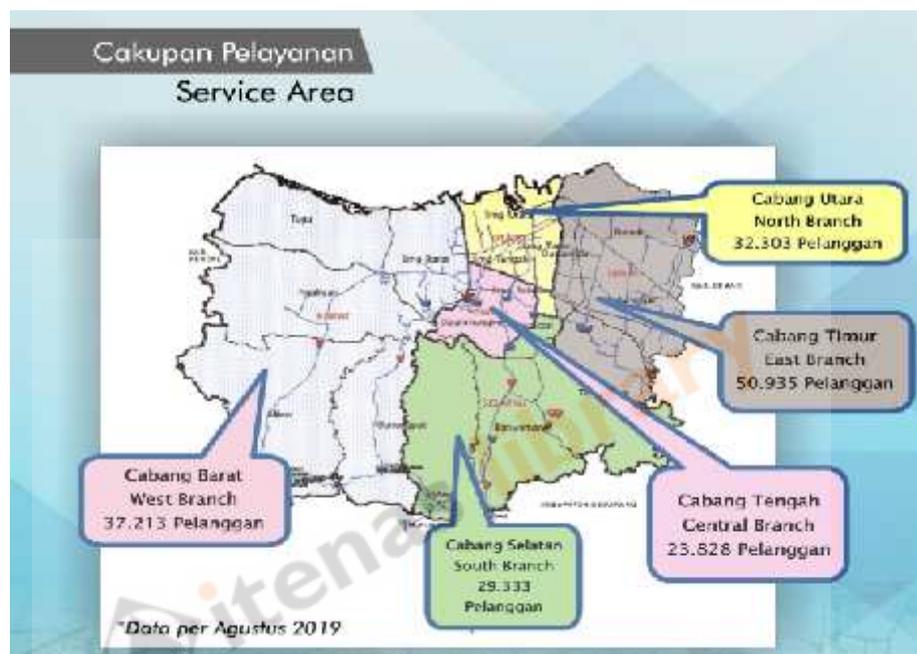
### **2.3.1. Kebutuhan Air**

Kondisi air sumur gali di wilayah Pantai Semarang sebagian besar mempunyai kondisi tidak layak pakai yaitu berasa payau sampai asin, bahkan banyak juga sumur gali yang mempunyai kondisi banger (bau yang tidak sedap). Kondisi air sumur gali tersebut bervariasi tergantung besarnya pengaruh dari intrusi air laut yang masuk. Hampir semua penduduk menggunakan sumur artesis dan jasa air dari PDAM untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari, karena sebagian air tanah di Pantai Semarang telah terkena intrusi dari air laut (Sriyono, Qudus, dan Setyowati, 2008). Cakupan pelayanan air PDAM dapat dilihat pada gambar 2.3.

### **2.3.2. Penggunaan Sumur Artesis**

Keberadaan industri-industri besar yang berlokasi di pelabuhan Tanjung Emas Semarang, hotel berbintang, kawasan permukiman elit, dan kawasan perkantoran di sepanjang pantai Kota Semarang memenuhi kebutuhan air bersih berasal dari sumur bor atau airtanah dalam. Pembuatan sumur bor memang harus berijin dan dikenai pajak, namun banyak para pengusaha dan masyarakat membuat sumur bor tanpa melakukan proses perijinan. Keberadaan jumlah dan

lokasi sumur bor semakin banyak dan sulit dideteksi atau dilacak. Jumlah penduduk di Kota Semarang dari tahun ke tahun semakin meningkat, diikuti dengan kebutuhan air bersih. Sehingga sebagian besar penduduk dan kebutuhan air terutama untuk industri di Kota Semarang masih harus memenuhi kebutuhan air bersihnya dari budidaya sendiri, yakni dari air tanah dengan cara membuat sumurgali, sumurpasak, dan sumur bor. Pada penelitian ini yang dijadikan ukuran adalah debit air sumur PDAM pada gambar 2.4.



**Gambar 2.3** Visualisasi Cakupan Pelayanan PDAM Semarang  
(PDAM Tirta Moedal Semarang, 2019)

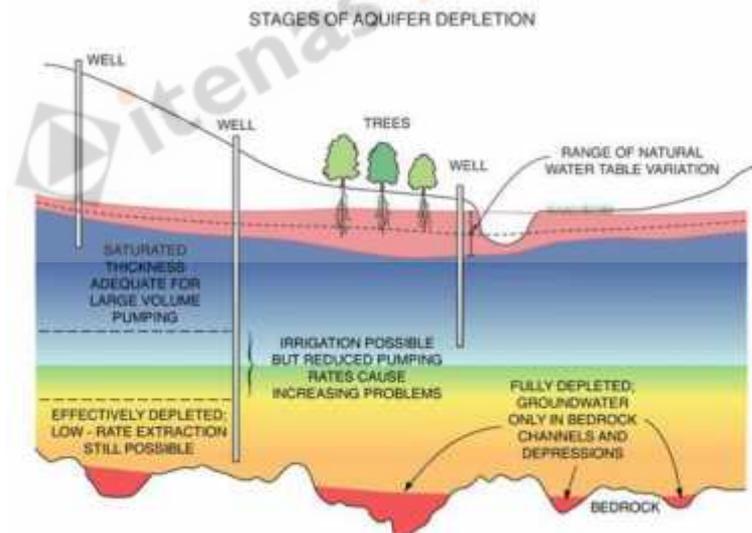


**Gambar 2.4** Produksi Sumur Artesis PDAM Semarang  
(PDAM Tirta Moedal Semarang, 2019)

### 2.3.3. Penurunan Muka Air Tanah (*Water Table Decline*)

*Water table* adalah suatu permukaan atas dari zona pori-pori dan fraktur tanah jenuh dengan air. Penurunan *water table* dapat didefinisikan sebagai suatu fenomena yang terjadi akibat ekstraksi air tanah yang berlebihan sehingga menyebabkan meja air (*water table*) menjadi turun. Dalam formasi air tanah, meja air mempunyai peranan penting yaitu menjadi batas antara air jenuh dan air tak jenuh.

Penarikan seribu galon air per menit (tingkat pemompaan yang umum untuk sumur dengan volume tinggi) adalah perubahan yang tidak wajar dalam sistem air tanah dan mengakibatkan beberapa gangguan utama pada muka air tanah. Awalnya, kadar air turun sangat cepat di sekitar sumur. Penurunan muka air tanah ini dikenal sebagai penarikan, dan mungkin berjumlah puluhan meter. Inilah sebabnya mengapa zona jenuh tipis tidak sesuai untuk pemompaan volume tinggi meskipun ada air besar - ketebalan jenuh harus cukup besar sehingga pompa dapat benar-benar tenggelam pada penarikan maksimum.



**Gambar 2.5** Zona penggunaan sumber daya dan kelimpahan akuifer progresif

(Sen, 2014)

Di daerah di mana muka air tanah menurun, akuifer dapat menjadi semakin tidak berguna untuk berbagai jenis penarikan karena tingkat air menurun dan melewati ketinggian di mana penarikan tingkat tinggi akan melebihi ketebalan

jenuh yang ada. Gambar 2.5 menggambarkan hal ini, dan selanjutnya mendefinisikan dan membahas beberapa masalah yang menyarankan kemungkinan kebutuhan akan definisi cadangan keberlanjutan - jumlah air dalam penyimpanan yang diperlukan untuk pengelolaan jangka panjang yang efektif. Berdasarkan penelitian (Nadiri, Taheri, Khatibi, Barzegari, dan Dideban, 2018) penurunan *water table* dapat dikategorikan menjadi beberapa kategori yang didasarkan dari model ALPRIFT, sedangkan kategori akuifer berdasarkan penurunan muka tanah didasarkan dari besar *rate* korelasi antara penurunan muka tanah dan penurunan *water table*.

## 2.4. Survei GPS

### 2.4.1 Global Positioning System (GPS)

*Global Positioning System* atau biasa disingkat (GPS) adalah sistem penentuan posisi yang berbasiskan pada pengamatan satelit-satelit navigasi. Prinsip studi penurunan tanah dengan metode survei GPS yaitu dengan menempatkan beberapa titik pantau di beberapa lokasi yang dipilih, secara periodik untuk ditentukan koordinatnya secara teliti dengan menggunakan metode survei GPS. Dengan mempelajari pola dan kecepatan perubahan koordinat dari titik-titik tersebut dari survei yang satu ke survei berikutnya, maka karakteristik penurunan tanah akan dapat dihitung dan dipelajari lebih lanjut (Wellenhof, 1997).

*Global Positioning System* (GPS) adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi yang berbasiskan pada pengamatan satelit-satelit *Global Positioning System*. Nama formalnya adalah NAVSTAR GPS, kependekan dari “*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Position System*”. Sistem yang dapat digunakan oleh banyak orang sekaligus dalam segala cuaca ini, didesain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga dimensi yang teliti dan juga informasi mengenai waktu, secara kontinyu di seluruh dunia (Abidin, 2006). GPS terdiri dari tiga bagian yaitu *space segment* (segmen ruang), *control segment* (segmen kontrol) dan *user segment* (pengguna segment). Segmen ruang terdiri

dari konstelasi satelit yang memancarkan sinyal radio kepada pengguna (*user*). Segmen kontrol berfungsi untuk mengontrol dan memantau operasional satelit dan memastikan bahwa satelit berfungsi sebagaimana mestinya seperti menentukan dan menjaga waktu sistem GPS. Segmen pengguna terdiri dari para pengguna satelit GPS, baik di darat, laut maupun di angkasa. Diperlukan alat penerima sinyal (*receiver*) untuk menerima dan memproses sinyal-sinyal dari satelit GPS untuk digunakan dalam penentuan posisi, kecepatan maupun waktu.

Sinyal GPS tersebut memberikan informasi antara lain:

1. Jarak (*kode*).
2. Informasi posisi satelit (*navigation message*).

Informasi posisi satelit (*navigation message*) berisi informasi tentang koefisien koreksi jam satelit, parameter orbit, almanac satelit, parameter koreksi ionosfer, dan informasi spasial lainnya seperti konstelasi dan kesehatan satelit.

3. Gelombang pembawa (*carrier wave*).

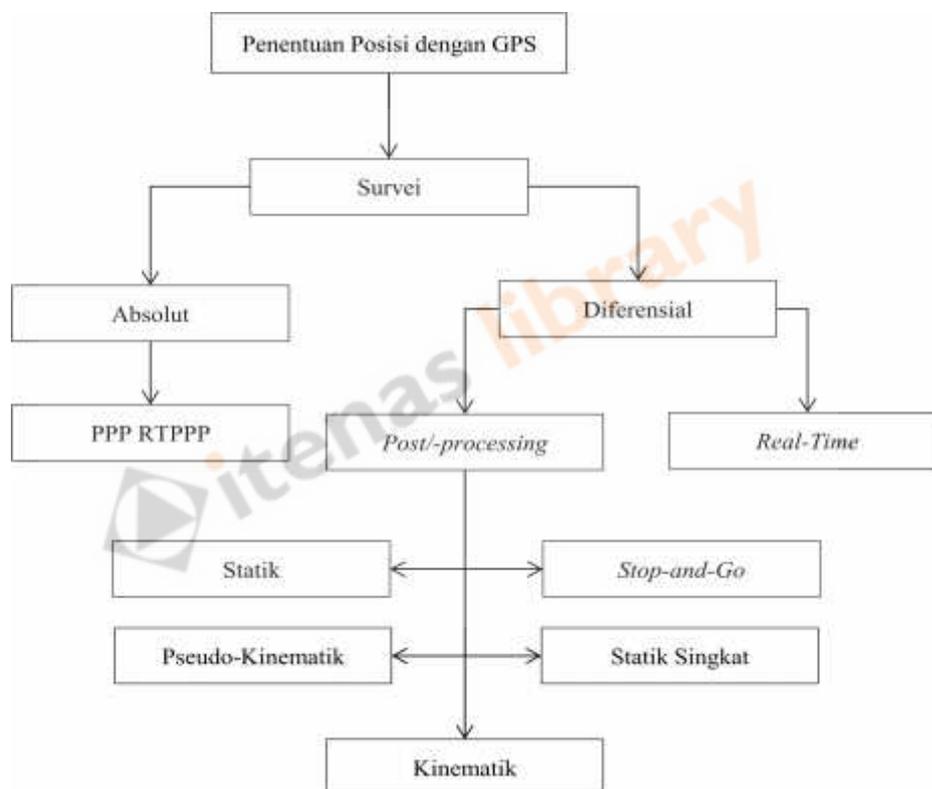
Gelombang pembawa (*carrier wave*) yang digunakan oleh GPS adalah L1 yang membawa kode-kode P(Y), C/A, dan pesan navigasi, serta L2 yang membawa kode P(Y) dan pesan navigasi.

#### **2.4.2. Prinsip Penentuan Posisi dengan GPS**

Pada dasarnya konsep dasar penentuan posisi dengan GPS adalah reseksi (pengikatan ke belakang) dengan jarak, yaitu dengan pengukuran jarak secara simultan ke beberapa satelit GPS yang telah diketahui koordinatnya (Abidin, 2006). Dalam penentuan posisi titik pada suatu epok dengan menggunakan GPS, terdapat empat parameter yang harus ditentukan yaitu tiga parameter koordinat (X,Y,Z) dan satu parameter kesalahan jam *receiver* GPS. Untuk itu dibutuhkan minimal pengamatan jarak ke empat satelit.

### 2.4.3. Metode Penentuan Posisi dengan GPS

Secara umum penentuan posisi dengan GPS dibagi menjadi 2 metode yaitu metode absolut dan metode relative seperti pada gambar 2.5. Metode absolut merupakan suatu metode penentuan posisi yang menggunakan 1 pesawat penerima (*receiver*) saja. Umumnya metode ini digunakan untuk keperluan navigasi yang tidak membutuhkan ketelitian posisi yang tinggi. Sedangkan metode relatif atau differensial merupakan metode penentuan posisi dengan menggunakan lebih dari 1 pesawat penerima (*receiver*). Metode relatif sering digunakan untuk keperluan survei geodesi atau pemetaan yang membutuhkan ketelitian tinggi.



**Gambar 2.6** Metode penentuan posisi dengan GPS

(Modifikasi dari: Abidin, 2006)

Penentuan posisi relatif adalah penentuan posisi suatu titik yang ditentukan relatif terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya. Penentuan posisi memerlukan minimal dua *receiver* GPS karena pada metode ini dilakukan proses *differencing* data yang diamati oleh dua *receiver* GPS pada waktu bersamaan.

Dalam hal ini, kesalahan jam *receiver* (jam *quartz*) dan jam satelit (jam atom) dapat dihilangkan, kesalahan bias dan ionosfer, troposfer, dan efemeris dapat direduksi, sedangkan kesalahan *multipath* dapat dieliminir dengan cara melakukan pengamatan yang relatif lama. Perlu dicatat, bahwa efektivitas *differencing* data ini sangat bergantung pada jarak antara titik yang diketahui koordinatnya dengan titik yang akan ditentukan koordinatnya. Semakin pendek jarak tersebut, maka akan semakin efektif dan sebaliknya (Abidin, 2006).

*Differencing* data ini menggunakan data pengamatan *double-difference* (DD) yaitu data selisih antara dua data pengamatan *single-difference*. Dalam hal ini empat data *one-way* di transformasi menjadi satu data pengamatan DD. Data pengamatan ini menggunakan data pengamatan antara pengamat ke satelit.

Secara matematis, data pengamat satelit *double-difference* ini (*pseudorange* dan fase) yang melibatkan dua pengamat (*i* dan *j*) dan serta dua satelit (*k* dan *l*) untuk suatu frekuensi pada suatu epok tertentu, dapat dituliskan seperti pada persamaan (3.1) dan (3.2) berikut :

$$P_{ij}^k = P_{ij}^l - P_{ij}^k \quad \dots (3.1)$$

$$= \rho_{ij}^k + d_{ij}^k + d_{ij}^k + d_{ij}^k + \vartheta_{ij}^k$$

$$L_{ij}^k = L_{ij}^l - L_{ij}^k \quad \dots (3.2)$$

$$= \rho_{ij}^k + d_{ij}^k + d_{ij}^k - d_{ij}^k + \lambda \cdot N_{ij}^k + \vartheta_{ij}^k$$

Dimana :

$P_{ij}$  = pseudorange pada frekuensi  $f_i$ (m), ( $i=1,2$ )

$L_{ij}$  = jarak fase (*carrier range*) pada frekuensi  $f_i$ (m), ( $i=1,2$ )

$c$  = kecepatan cahaya dalam vakum (m/s)

$\rho$  = jarak geometris antara stasiun pengamat dengan satelit (m)

$\lambda$  = panjang gelombang dari sinyal (m)

=  $c/f$  ( $f$  adalah frekuensi)

$d$	= kesalahan jarak disebabkan oleh kesalahan ephemeris (orbit)
$d$	= bias yang disebabkan oleh refraksi troposfer (m)
$d$	= bias yang disebabkan oleh refraksi ionosfer (m)
$Dt, dT$	= kesalahan dan offset dari jam <i>receiver</i> dan jam satelit (m)
$N_1, N_2$	= ambiguitas fase dari fase sinyal-sinyal L1 dan L2
$\partial P_i, \partial C_i$	= <i>noise</i> pada hasil pengamatan $P_i$ dan $L_i$ (m)

#### 2.4.4. Kesalahan dan Bias pada GPS

Dalam perjalanan sinyal GPS, dari satelit sampai pengamat pasti tidak terlepas dari berbagai kesalahan dan bias (Abidin, 2006). Kesalahan dan bias GPS tersebut dapat terkait dengan satelit (kesalahan ephemeris, jam satelit, dan *selective availability*), medium propagasi (bias ionosfer dan troposfer), *receiver* GPS (kesalahan jam *receiver* dan *noise*), data pengamatan (ambiguitas fase dan *cycle slip*) dan lingkungan sekitar lokasi pengamatan GPS (*multipath* dan *imaging*).

1. Kesalahan ephemeris merupakan kesalahan dimana orbit satelit yang dilaporkan oleh ephemeris satelit tidak sama dengan orbit satelit yang sebenarnya sehingga akan mempengaruhi ketelitian koordinat titik-titik yang ditentukan.
2. Kesalahan jam satelit ini dapat berupa kesalahan jam satelit maupun kesalahan jam *receiver*. Bentuk kesalahannya dapat berupa bentuk *offset* waktu, *offset* frekuensi, maupun *frequency drift*. Kesalahan jam ini akan langsung mempengaruhi ukuran jarak, baik *pseudorange* maupun jarak fase.
3. *Selective availability* (SA) merupakan metode yang pernah diaplikasikan untuk memproteksi ketelitian posisi absolut secara *real-time* yang tinggi dari GPS hanya untuk pihak militer Amerika Serikat dan pihak-pihak yang berwenang. Namun, sejak 2 Mei 2000 kebijakan SA sudah dinonaktifkan.

4. Bias ionosfer akan mempengaruhi kecepatan, arah, polarisasi, dan kekuatan GPS yang melaluinya. Ionosfer akan memperlambat kecepatan sinyal dan mempercepat fase, dengan bias jarak yang sama besarnya. Jadi secara umum, bias ionosfer dapat mengakibatkan ukuran jarak yang dihasilkan menjadi kurang teliti.
5. Bias troposfer akan mempengaruhi kecepatan sehingga akan menghasilkan ukuran jarak yang kurang teliti. Lapisan troposfer ini memperlambat data waktu dan data fase.
6. Ambiguitas fase dari pengamatan fase sinyal GPS merupakan jumlah gelombang penuh yang tidak terukur oleh *receiver* GPS (Abidin, 2006). Untuk dapat merekonstruksi jarak ukuran antara satelit dengan antena maka harga ambiguitas fase tersebut harus ditentukan terlebih dahulu. Hal ini diperlukan pada saat pengubahan data fase menjadi hasil ukuran jarak sehingga dihasilkan ketelitian yang sangat presisi. Nilai ambiguitas fase akan selalu tetap selama pengamatan tidak terjadi *cycle slip*. Penentuan ambiguitas fase ini dilakukan dengan cara pemberian koreksi terhadap nilai ambiguitas fase yang mengambang (*float*) sehingga diperoleh nilai ambiguitas fase yang integer.
7. *Cycle slip* merupakan ketidak-kontinuan dalam jumlah gelombang penuh dari fase gelombang pembawa yang diamati, karena sinyal ke *receiver* terputus pada saat pengamatan sinyal. Jika dilakukan *plotting* data pengamatan fase terhadap waktu, maka *cycle slip* dapat dideteksi dari terdapatnya loncatan mendadak kurva grafik. Dalam proses pengolahan data untuk perhitungan posisi, pengoreksian *cycle slips* bisa dilakukan sebagai suatu proses tersendiri sebelum proses estimasi posisi, ataupun secara terpadu dengan proses pengestimasi posisi.
8. *Multipath* merupakan fenomena dimana sinyal dari satelit tiba di antena GPS melalui dua atau lebih lintasan yang berbeda (Abidin, 2006). Dalam hal ini, satu sinyal merupakan sinyal langsung dari satelit ke antena, sedangkan yang lainnya merupakan sinyal-sinyal tidak langsung yang dipantulkan oleh benda-benda di sekitar antena sebelum tiba di antena.

Perbedaan panjang lintasan menyebabkan sinyal-sinyal tersebut berinterferensi ketika tiba di antena yang mengakibatkan kesalahan pada hasil pengamatan. Kesalahan akibat *multipath* akan menghasilkan ukuran jarak yang kurang teliti. *Multipath* akan mempengaruhi hasil ukuran *pseudorange* dan *carrier phase*.

9. Imaging merupakan suatu fenomena yang melibatkan suatu benda konduktif (konduktor) yang berada dekat dengan antena GPS, seperti reflektor berukuran besar maupun *groundplane* dari antena itu sendiri (Abidin, 2006). Efek dari imaging ini adalah akan memunculkan antena 'bayangan' (*image*) atau dengan kata lain fenomena imaging ini akan mendistorsi pola fase antena yang seharusnya. Hal ini mengakibatkan perubahan titik pusat fase antena sehingga akan menyebabkan terjadinya kesalahan pada ukuran jarak.

#### 2.4.5. Pengukuran Penurunan Muka Tanah dengan GPS

Untuk melihat nilai penurunan muka tanah dibutuhkan akurasi posisi titik yang sangat teliti (orde mm) karena perubahan sekecil apapun harus dapat teramati. Maka dari itu dapat digunakan pengukuran GPS dengan metode statik menggunakan data fase dari *receiver* dual frekuensi untuk mendapatkan akurasi yang baik. Untuk memantau penurunan muka tanah di wilayah Semarang dapat menggunakan metode differensial. Dengan metode differensial posisi suatu titik ditentukan relatif terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya (titik referensi). Dengan mengurangi data yang diamati oleh dua *receiver* GPS pada waktu bersamaan, maka beberapa jenis kesalahan dan bias dari data dapat dieliminasi atau direduksi. Pengeliminasian dan pereduksian ini akan meningkatkan akurasi dan presisi data yang diperoleh.

#### 2.5. Pengolahan Software Ilmiah Bernese GNSS Version 5.2

Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak ilmiah Bernese 5.2 yang dikembangkan oleh Astronomical Institute University of Berne Swiss. Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk berbagai keperluan yang menuntut

ketelitian posisi tinggi seperti pengadaan jaringan kontrol, pemantauan geodinamika Bumi, pemodelan 29 troposfer dan ionosfer di suatu wilayah, dan termasuk untuk pemantauan penurunan muka tanah di wilayah Semarang.

Data pengamatan GPS yang tersimpan pada *receiver* umumnya masih dipengaruhi oleh kesalahan dan bias yang terkait dengan satelit (kesalahan orbit dan kesalahan jam satelit), *receiver* (kesalahan jam *receiver*, kesalahan pusat fase antena, dan *noise*), dan pada data pengamatan (ambiguitas fase serta kesalahan dan bias lingkungan sekitar pengamatan GPS). Kesalahan dan bias yang dapat diestimasi secara optimal menggunakan perangkat lunak Bernese 5.2 antara lain (Darch, 2015) :

1. Kesalahan orbit, direduksi menggunakan informasi *precise ephemeris* .
2. Kesalahan akibat media propagasi (bias ionosfer dan bias troposfer), direduksi dengan melakukan pemodelan tertentu, juga dapat dilakukan dengan mengestimasi parameter bias tersebut. Pemodelan bias troposfer pada *software* Bernese 5.2 antara lain *Saastomeinen, Niell, Hopfield, Essen and Frome*, dan *Marini-Murray*. Untuk bias ionosfer dapat dilakukan dengan pemodelan ionosfer .
3. Kesalahan akibat antenna *receiver* dapat direduksi menggunakan model tertentu yang terkait dengan variasi pusat antenna yang digunakan.
4. Pemecahan ambiguitas pada perangkat lunak Bernese 5.2 dapat dilakukan dengan berbagai metode antara lain *Round, Sigma, Search dan Quasi Ionosphere Free (QIF)*.

## 2.6. Interpolasi

Interpolasi merupakan suatu metode pencitraan untuk menambah atau mengurangi jumlah piksel dalam citra digital. Proses interpolasi ini digunakan untuk menghasilkan citra yang lebih detail.

1. Inverse Distance Weighted (IDW)  
Metode ini memiliki asumsi bahwa setiap titik *input* mempunyai pengaruh yang bersifat lokal yang berkurang terhadap jarak. Jadi semakin dekat jarak antara titik sampel dan blok yang akan diestimasi maka semakin besar bobotnya, begitu juga sebaliknya. (Watson, 1985). Kelemahan dari metode IDW ini adalah nilai hasil interpolasi terbatas pada nilai yang ada pada data sampel.
2. Kriging  
Kriging merupakan suatu metode estimasi stokastik yang mirip dengan IDW, menggunakan kombinasi linear dari weights untuk memperkirakan nilai di antara sampel data. (Pramono, 2008)
3. *Natural Neighbour*  
Metode ini dikenal juga dengan interpolasi Sibson atau “*area-stealing*”. Sifat dasar metode interpolasi ini adalah lokal, dimana hanya menggunakan sampel yang berada di sekitar titik yang ingin di interpolasi, dan hasil yang diperoleh akan mirip dengan ketinggian sampel yang digunakan sebagai nilai masukan proses interpolasi. (Sibson, 1981)
4. *Spline*  
Metode *Spline* merupakan metode yang mengestimasi nilai dengan menggunakan fungsi matematika yang meminimalisir total kelengkungan permukaan (Childs, 2004). Kelebihan dari metode ini adalah kemampuan untuk menghasilkan akurasi permukaan yang cukup baik walaupun data yang digunakan hanya sedikit.

## 2.7. Ringkasan Studi – Penurunan Muka Tanah

Pada penelitian ini terdapat beberapa penelitian yang berhubungan dengan pemantauan fenomena penurunan muka tanah lebih khususnya yang dapat dijadikan referensi, rujukan, dan masukan antara lain sebagai berikut:

Pada penelitian yang dilakukan oleh Alfian Budi Prasetya, Bambang Darmo Yuwono, dan Moehammad Awaluddin (2017) yang bertemakan

“PEMANTAUAN PENURUNAN MUKA TANAH KOTA SEMARANG TAHUN 2016 MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK GAMIT 10.6”. Adapun maksud dan tujuan penelitian tersebut adalah menentukan besar nilai penurunan muka tanah di Kota Semarang pada tahun 2015-2016 menggunakan metode GPS serta menentukan besar kerugian ekonomi yang ditimbulkan oleh bencana banjir rob di kota Semarang. Nilai penurunan muka tanah yang terjadi pada tahun 2016 dengan membandingkan data pengukuran tahun 2015 ke 2016 didapatkan rentang penurunan sebesar 7,33 -34,9 cm. Nilai laju penurunan tanah yang terjadi pada tahun 2013-2016 memiliki rentang 2,07-17,04 cm/tahun. Dengan nilai laju penurunan terbesar berada pada titik KOP8 (17,04 cm/tahun) dan laju penurunan terkecil terjadi pada titik SP05 (2,07 cm/tahun). Laju penurunan untuk titik N259, K371, SMK3, CTRM masing-masing sebesar 2,26 cm/tahun; 3,39 cm/tahun; 2,4 cm/tahun; 10,39 cm/tahun. Besar kerugian ekonomi yang ditimbulkan dari bencana banjir rob di kota Semarang pada sektor pemukiman sebesar Rp. 545,985 miliar dan sektor infrastruktur jalan sebesar Rp. 70,466 miliar.

Berikutnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Dino Gunawan Pribandono dan Supriyadi (2017) yang berjudul “ ZONASI PENURUNAN MUKA AIR TANAH DI WILAYAH PESISIR BERDASARKAN TEKNIK GEOFISIKA GAYABERAT MIKRO 4D (STUDI KASUS: DAERAH INDUSTRI KALIGAWA - SEMARANG)”. Tujuan dari penelitian tersebut adalah mengetahui zonasi perubahan muka air tanah dan membuat peta zonasi penurunan muka air tanah berdasarkan data geofisika (gayaberat mikro 4D, gradien vertikal gayaberat 4D) di daerah penelitian. Dari peta zonasi yang telah dibuat dapat diketahui bahwa hampir 70 % daerah penelitian mengalami penurunan muka air tanah dan amblesan tanah dengan waktu yang hampir bersamaan, hal ini disebabkan karena perkembangan pengambilan air tanah yang pesat di daerah ini dan mengakibatkan perubahan kondisi dan lingkungan air tanah, sebagai pencerminan terjadinya kerusakan tata airtanah dengan beberapa kualitas air sumur penduduk yang berubah menjadi payau . Bukti-bukti yang menunjukkan adanya penurunan muka air tanah perubahan tersebut diantaranya:

1. Terjadinya amblesan tanah di daerah penelitian
2. Keadaan tinggi air tanah

yang terdapat dalam sumur pantau yang terus mengalami penurunan . Meskipun faktor penyebab utama belum diketahui secara pasti, namun faktor penurunan muka air tanah akibat pengambilan air tanah yang berlebihan untuk keperluan industri, diyakini ikut berperan dalam penurunan muka air tanah, karena di daerah industri Kaligawe terdapat beberapa perusahaan yang bergerak di bidang garmen, pengolahan hasil laut, produk makanan dan otomotif. Untuk mencegah penurunan muka airtanah lebih lanjut di daerah industri Kaligawe - Semarang maka perlu diadakannya pengisian airtanah (*ground water recharge*) yang berguna untuk menanggulangi defisit airtanah, telah banyak pemikir yang mengajukan konsep pengisian buatan (*artificial recharge*), misalnya dengan membuat lubang resapan biopori disekitar rumah. Untuk daerah pesisir pengisian airtanah buatan mempunyai kegunaan sebagai berikut: 1. Menyimpan kelebihan air permukaan di dalam akuifer. 2. Memperbaiki kualitas airtanah lokal melalui pencampuran dengan pengisian airtanah yang berasal dari air hujan. 3. Pembantuan tabir tekanan (*pressure barriers*) untuk mencegah intrusi air asin. 4. Meningkatkan produksi airtanah, baik untuk diminum maupun untuk keperluan lainnya. 5. Pengurangan biaya operasi pompa dengan meningginya muka airtanah. 6. Mencegah terjadinya penurunan muka tanah (*land subsidence*).

Dengan memadukan metoda gayaberat mikro 4D dan gradien vertikal gayaberat 4D akan memiliki karakteristik dalam memberikan informasi anomali yang diberikan sehingga dapat digunakan untuk membantu dalam intepretasi. Dalam kasus penurunan muka airtanah didaerah industri Kaligawe - Semarang menunjukkan bahwa penggunaan gayaberat mikro 4D dan gradien vertikal gayaberat 4D secara bersamaan dapat membatu dalam proses intepretasi sehingga dapat diketahui batas-batas anomali dimana memberikan informasi zona-zona penurunan muka air tanah dan amblesan, dan hampir 70% daerah penelitian mengalami penurunan muka airtanah dan amblesan, hal ini didukung dengan adanya penurunan muka airtanah dari beberapa sumur pantau yang ada di sekitar daerah penelitian.

Salah satu penelitian yang dilakukan bersama dengan Kelompok Keahlian/Keilmuan Geodesi ITB (KKGD-ITB), yang berjudul “ STUDI PENURUNAN MUKA TANAH WILAYAH KABUPATEN DEMAK”.

Penelitian tersebut dipublikasikan oleh Wisnu Bagus Nugroho (2018). Tujuan dari penelitian tersebut adalah memberikan informasi nilai penurunan muka tanah yang terjadi di wilayah Kabupaten Demak berdasarkan survei pengamatan GPS dan data InSAR. Selain itu, pada penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui faktor-faktor penyebab beserta dampak penurunan muka tanah di wilayah Kabupaten Demak. Berdasarkan analisis hasil korelasi kuantitatif dan korelasi menggunakan metode pembobotan, adanya kawasan industri dan luasnya daerah pertanian menjadi faktor penyebab peningkatan nilai dan luas dari fenomena penurunan muka tanah di wilayah Kabupaten Demak. Hal ini dapat terlihat pada jumlah korelasi yang tinggi pada nilai penurunan tanah yang besar. Hal ini berbanding lurus dengan penambahan wilayah sawah, pemukiman, daerah industri yang menyebabkan bertambahnya penggunaan air tanah dan beban bangunan yang akan berimbas pada turunnya permukaan tanah di Kabupaten Demak.

Berlanjut pada penelitian yang dilakukan oleh Redho Surya Perdana (2019) yang dijadikan rujukan pada ringkasa studi penelitian penurunan muka tanah di wilayah Semarang, bertema “ANALISIS KERUSAKAN AKUIFER TERTEKAN WILAYAH JAKARTA DARI INVERSI DATA KORELASI *LAND SUBSIDENCE* DAN *WATER TABLE DECLINE*”. Secara umum tujuan dari penelitian ini adalah membuat sebuah model kerusakan akuifer tertekan di wilayah Jakarta dengan menggunakan inverse data korelasi penurunan muka tanah dan *water table*. Hasil analisis menunjukkan bahwa secara spasial dapat disimpulkan bahwa secara keseluruhan keadaan akuifer tertekan di wilayah DKI Jakarta pada saat ini (tahun 2019) dikategorikan cukup baik di bagian selatan dan rusak di bagian utara DKI Jakarta. Di beberapa daerah seperti wilayah barat dan timur kota Jakarta Utara dan wilayah timur kota Jakarta Timur dikategorikan rusak dan cukup rusak. Sedangkan wilayah kota Jakarta Selatan dan Jakarta Pusat dikategorikan cukup baik.