

BAHAYA PEMOMPAAN AIR TANAH TERHADAP LAND SUBSIDENCE PADA LAPISAN TANAH LUNAK

Suwarno¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
E-mail: suwarno.surabaya@gmail.com

Abstrak. Pemakaian air tanah yang berlebihan akan mengakibatkan penurunan muka tanah yang sangat luas (*land subsidence*). Tidak sedikit kerugian yang diakibatkan oleh *land subsidence*, sebagai contoh diantaranya adalah turunnya konstruksi *jetty* di Terminal Peti Kemas dan daerah sekitar pelabuhan Tanjung Emas Semarang. Tujuan mencari penyebab *land subsidence* sangatlah penting untuk memperkecil dampak penurunan tanah yang akan terjadi di masa mendatang. Metodologi yang paling sederhana untuk mencatat penurunan tanah adalah dengan melakukan pemetaan topografi secara berkala. Namun hal yang sangat penting dipelajari adalah mencari penyebab utama peristiwa *land subsidence*. Adapun beberapa faktor penyebab penurunan permukaan tanah antara lain proses-proses geologi seperti aktifitas vulkanik dan tektonik, siklus geologi, adanya rongga di bawah permukaan tanah; pengambilan bahan cair dari dalam tanah seperti air tanah atau minyak bumi; adanya beban-beban berat di atasnya seperti struktur bangunan sehingga lapisan-lapisan tanah dibawahnya mengalami kompaksi atau konsolidasi. Hasil yang diperoleh dari analisa probabilitas penyebab terjadinya *land subsidence* menjadi dasar penanganan pencegahan atau memperkecil kerusakan yang terjadi akibat *land subsidence*. Kesimpulan yang didapatkan sebagai penyebab *land subsidence* bukanlah pemompaan air tanah semata, melainkan banyak hal diantaranya pembebanan yang melebihi daya dukung tanah maupun penurunan muka tanah akibat pengambilan bahan padat dari tanah (aktifitas pengerukan).

Kata kunci: land subsidence, pemompaan, penurunan, tanah lunak

I. PENDAHULUAN

Sebenarnya air permukaan (di danau dan sungai) dan air tanah (dalam *aquifer*) belum tentu terpisah dan independen sumber airnya. Misalnya, keterkaitan antara sungai atau danau dan *aquifer* yang berdekatan, atau sungai yang melewati daerah dimana ada *aquifer* freatik. Jika dasar sungai atau danau tidak sepenuhnya tersumbat, air akan mengalir melewatinya dari sungai ke *aquifer* saat permukaan air di tempat yang lebih tinggi, dan sebaliknya (Bear, J., 2012).

Airtanah (*groundwater*) adalah air yang bergerak dan berada di bawah permukaan tanah di dalam zona jenuh (*saturation zone*) dimana tekanan hidrostatiknya sama atau lebih besar dari tekanan atmosfer.

Land subsidence adalah penurunan permukaan tanah (secara bertahap atau tiba-tiba) akibat adanya pergerakan butiran tanah dibawah permukaan tanah. Penurunan tanah ketika air dipompa keluar dari *aquifer* tertekan (*confined aquifer*), tegangan antar butiran tanah meningkat meskipun tanpa adanya perubahan beban di permukaan tanah. Bila lapisan yang relatif

lunak (misalnya, tanah liat, atau lanau) ada didalam *aquifer*, lapisan tersebut akan mampat dan akan terjadi penurunan tanah (*land subsidence*). Apabila *land subsidence* sangat signifikan, pemompaan air tanah perlu dibatasi atau bahkan memaksa penghentian pemompaan.

Secara umum penyebab utama terjadinya *land subsidence* adalah pemadatan sistem *aquifer*, drainase pada tanah organik, penambangan bawah tanah, "hydro-compaction", pemadatan alami, lubang pembuangan (*sinkholes*), dan pencairan lapisan es. Lebih dari 80 persen *land subsidence* disebabkan adanya eksploitasi air bawah tanah karena adanya peningkatan pengembangan sumber daya air.

Tidak sedikit kerugian yang diakibatkan oleh *land subsidence*, sebagai contoh diantaranya adalah turunnya konstruksi *jetty* di Terminal Peti Kemas dan daerah sekitar pelabuhan Tanjung Emas Semarang. Dengan demikian, mempelajari penyebab terjadinya *land subsidence* sangatlah penting untuk memperkecil dampak penurunan tanah yang akan terjadi di suatu daerah saat ini dan pencegahannya di masa mendatang.

Salah satu penyebab utama terjadinya *land subsidence* adalah kegiatan pemompaan tanah yang berlebihan sehingga menyebabkan *overdraft* dan menghasilkan penurunan tanah secara permanen.

Hasil penelitian Tobing, dkk (2001) amblesan lahan di sebagian Kota Semarang mencapai 15 cm per tahun terjadi di Tanjung Mas ke arah timur hingga pantai di wilayah Kecamatan Genuk dan sebagian Kecamatan Sayung yang masuk wilayah Kabupaten Demak, kemudian disusul daerah Bandarharjo dan sekitarnya sebesar 10 – 15 cm per tahun, Tanah Mas, Stasiun Tawang, Karang Tengah, Marina dan Tawang Mas 5 – 10 cm per tahun. Di daerah Selatan dan Tenggara seperti Bangetayu dan sekitarnya amblesan umumnya dibawah 5 cm per tahun. Amblesan di sebagian kota Semarang umumnya terjadi pada dataran aluvial dengan kedalaman yang berbeda, semakin ke utara umumnya amblesan semakin besar. Holtz (1985) menjelaskan penyebab amblesan tanah diduga akibat pemampatan endapan aluvial secara alami, pembebanan bangunan, pengurangan tanah dan ekstraksi air tanah melebihi kemampuannya (*safe yield*).

Kondisi lapisan tanah di kota Semarang secara umum berupa lapisan *silty clay* sangat lunak sampai lunak sampai kedalaman -25m sedang mengalami amblesan (*under consolidated layer*), sedangkan lapisan *silty clayed* dengan konsistensi *stiff* menuju *very stiff* dijumpai pada kedalaman di bawah -25m, lapisan ini tidak mengalami amblesan (*consolidated*). Ada beberapa lokasi yang lapisan tanah sifatnya berbeda (unik) seperti Erlangga Tengah, Jalan Jendral Sudirman dan Sugiopranoto lapisan tanahnya berselang-seling *dari clay, silt, sand* dan *gravel* (Soedarsono, Rifqi Brilliyant Arief, 2009).

II. PEMOMPAAN AIR TANAH

Pemompaan air tanah secara berlebihan dapat mengakibatkan menurunnya permukaan tanah. Penurunan permukaan air tanah akan mengakibatkan pengurangan gaya angkat tanah, dengan kata lain tegangan efektif tanah akan meningkat.

Peningkatan tegangan efektif tanah ini menyebabkan penyusutan butiran tanah kembali dan penurunan tanah (Terzhagi dalam Danaryanto; Kodoatie, 2010: 5). Disamping itu akan terjadi erosi atau terangkutnya butiran di bawah muka air tanah akibat pemompaan sumur dalam (*deep well*) secara berlebihan.

Jadi eksploitasi air tanah yang berlebihan akan mengakibatkan erosi bagian dalam tanah karena butira tanah terangkut sehingga menyebabkan penurunan muka air tanah yang permanen dan penurunan tanah pada areal yang cukup luas (*land subsidence*). Oleh sebab itu, debit pemompaan air tanah tidak boleh melebihi potensi aquifernya.

Uji pemompaan (*pumping test*) pada sumur diperlukan untuk mengetahui kapasitas atau potensi *aquifer* yang ada. Hal ini penting dilakukan agar diketahui batasan maksimum debit pemompaan yang

masih aman dan tidak terjadi ‘*over draft*’.

Tujuan utama pelaksanaan uji pemompaan ini adalah:

- a. Pengujian akuifer (*Aquifer test*)
Pengujian akuifer (*‘long-term constant rate test’*) adalah pengukuran parameter yang arahnya horisontal terhadap sumur uji, sehingga diperlukan beberapa sumur pengamat (*observation well*) disekitar sumur uji; dan pada uji akuifer ini biasanya disertai pula dengan *recovery test*, yang merupakan uji pemulihan kedudukan muka airtanah setelah dipompa.

Hasil pengujian *aquifer* didasarkan pada nilai koefisien *storage* (daya simpan air), *S*, yang menyatakan apakah akuifer tersebut dikategorikan sebagai *confined aquifer*, *leaky* atau semi *confined aquifer* atau termasuk *unconfined aquifer*.

Rentang nilai *S* adalah sebagai berikut:

$S = 0,00001 - 0,001$ (*Confined Aquifer*),

$S = 0,001 - 0,05$ (*Leaky/Semi Confined Aquifer*),

$S = 0,05 - 0,30$ (*Unconfined Aquifer*).

- b. Pengujian sumur (*Well test*)
Tujuannya adalah untuk menetapkan kemampuan sumur dan tidak dibutuhkannya *piezometer* didekatnya serta lebih sederhana daripada pengujian *aquifer*. Uji ini lebih ditekankan pada perekaman data atau parameter sumur secara vertikal. Dari debit dan muka air tanah yang diukur, dapat diperoleh kapasitas jenis (*specific capacity*) sumur, yang dinyatakan oleh besarnya debit setiap satuan penurunan dan dapat diperoleh penurunan jenis (*specific drawdown*) yang dinyatakan dengan besarnya penurunan setiap satuan debit.

Ada beberapa metoda *pumping test* antara lain:

- a. Uji pemompaan debit konstan (*Long-term constant rate test*) dapat dilakukan dengan metode Jacob, metode Theis (1935) dan metode Cooper-Jacob (Cooper & Jacob, 1946) untuk aliran tak tunak dalam *aquifer* tertekan.
- b. Uji pemompaan bertahap (*Step-drawdown test*); dilakukan dengan beberapa metode :
 - Metode I : Metode Jacob.

Dari data uji step test dibuat grafik hubungan antara *s* (*drawdown*) dan *t* (waktu pemompaan). Dari grafik hubungan antara *s* dan *t* di atas tentukan harga Δs (tambahan penurunan muka air tanah) pada setiap step (tambahan penurunan muka airtanah) pada setiap step. Untuk menentukan harga-harga *C* dan *B*, plot pada kertas milimeter harga-harga *Q* (l/detik) lawan S_w/Q (m²/detik),

- tarik garis berat harga-harga Q (l/detik) lawan Sw/Q (m/l/detik), tarik garis berat (lurus) yang melalui titik-titik hasil pengeplotan, selanjutnyamenentukan harga a dan b. Menghitung harga BQ dan
- c. Menentukan harga Sw dapat berdasarkan kurva pada atau denganrumus $Sw = BQ + C$. Menentukan efisiensi pemompaan (Ep). Menentukan faktor *development* (Fd). Menentukan klas dan kondisi sumur. Efisiensi sumur tergantung pada besarnya pemompaan yang terdiri atas efisiensi pemompaan (Fp) dan faktor *development* (Fd). $Ep = BQ/Sw \times 100\%$. Besarnya pemompaan yang efisien apabila harga Epnya minimal 50%. Faktor *development*, $Fd = C/B \times 100\%$.
- Metode II: Pada metode ini dilakukan dengan cara membandingkan setiap kapasitas jenis pada setiap langkah pemompaan. Jadi: $Q1/Sw1 : Q2/Sw2 : \dots : Qn/Swn$ (m³/jam/l). Apabila harga mendekati kesamaan dengan perbedaan <1 maka konstruksi sumur sempurna.
 - Metode III (Metode Logans). Dari data pengamatan step test dan perhitungan, dibuat tabulasi data. Membuat gambar kurva dalam kertas milimeter, antara Sw/Q pada koordinat dan Q pada absis untuk mencari Q optimum. Menentukan Q optimum dengan cara menarik garis dari titik hargaititik harga Sw/Q = 50 searah dengan absis hingga memotong kurva. Dari perpotongan antara garis Sw/Q = 50 dan kurva, tarik garis tegaklurus ke arah absis. Titik hasil perpotongan antara garis tegak lurus dan garis absis dibaca sebagai nilai Q optimum. Dihitung T (transmissivity) dengan metode Logans. Q = Q optimum. Sw : (harga Sw pada saat Q optimum) = Qoptimum x 50. Menghitung harga k = permeabilitas dengan rumus $T = k.D$, dimana D = tebal *aquifer*.

III. PEMODELAN LAND SUBSIDENCE

Untuk mengetahui besarnya *land subsidence* dalam suatu area, telah dikembangkan model numerik 3-D untuk mensimulasikan dan memprediksi penurunan tanah. Model penurunan muka tanah tiga dimensi (3-D) termasuk model aliran air tanah 3-D dan model geometris 3-D dikembangkan untuk mensimulasikan deformasi 3-D sistem *aquifer*. Pemodelan ini telah diaplikasikan di Shanghai seluas 660km², dengan 10 juta penduduk, bangunan tinggi padat, dan 11 jalur

metro. Simulasi mencakup periode dari tahun 1979 sampai 1995.

Ada dua asumsi yang berbeda telah diuji dengan batas samping (*side boundary*) yaitu menghalangi ketiga komponen perpindahan (*displacement*), atau dengan asumsi kondisi perpindahan bebas (*free displacement*). Distribusi penurunan tanah yang telah dihitung dan perpindahan horizontal di *aquifer* yang berbeda dianalisis. Perpindahan vertikal yang dihitung cukup mendekati hasil pengamatan yang dilakukan.

Model penurunan tanah 3-D yang dikembangkan ini sangat realistis dan dapat digunakan untuk mensimulasikan dan memprediksi pergerakan sistem *aquifer* 3-D di suatu daerah, sehingga dapat memberikan informasi ilmiah kepada pemerintah dalam mengendalikan *land subsidence* (penurunan tanah) dan pergerakan permukaan tanah.

Model *land subsidence* 3-D (*uncoupled land subsidence model*) dapat ditunjukkan pada Persamaan 1 sampai Persamaan 4 (Verruijt, 1969).

$$\frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{1}{1-2\nu} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \nabla^2 u_x \right) = \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{1}{1-2\nu} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \nabla^2 u_y \right) = \frac{\partial P}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{1}{1-2\nu} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \nabla^2 u_z \right) = \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (K_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j}) = S_s \frac{\partial H}{\partial t} + q_{ij} = x, y, z \quad (4)$$

dimana:

E = *Young modulus*,

ν = *Poisson ratio*,

u_x, u_y dan u_z = komponen *displacement* searah sumbu x, y dan z,

ε = *incremental volume strain*, yaitu:

$$\varepsilon = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

P adalah kenaikan tekanan air pori (*incremental pore water pressure*) = $\gamma_w \cdot H$ dengan γ_w = berat volume air dan H = kenaikan *hydraulic head*; sedangkan ∇^2 adalah *operator laplace*.

K_{ij} adalah *hydraulic conductivity* sensor; t adalah waktu; q adalah debit (*source*); S_s adalah *specific storage* yaitu $S_s = \gamma_w (\alpha + n\beta)$; α = *vertical odoemetric compressibility* dimana:

$$\alpha = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)}$$

Nilai α ini tidak konstan, dan ambil nilai elastis α_{ke} jika tegangan efektif lebih kecil dari tegangan prakonsolidasi; serta ambil nilai plastis α_{kv} jika sebaliknya (Ye et al., 2011, 2012). Demikian pula S_{ske} dan S_{skv} dilambangkan untuk kondisi elastis dan plastis. Sedangkan n = porositas media; dan β = *water volumetric compressibility*.

IV. PENYEBAB *LAND SUBSIDENCE* DAN LOKASI TELAH TERJADI *LAND SUBSIDENCE* DI INDONESIA

Secara garis besar penurunan tanah bisa disebabkan oleh beberapa hal antara lain (Whittaker and Reddish, 1989), sebagai berikut:

1. Penurunan muka tanah alami (*natural subsidence*) yang disebabkan oleh proses-proses geologi seperti aktifitas vulkanik dan tektonik, siklus geologi, adanya rongga di bawah permukaan tanah dan sebagainya.
2. Penurunan muka tanah yang disebabkan oleh pengambilan bahan cair dari dalam tanah seperti air tanah atau minyak bumi.
3. Penurunan muka tanah yang disebabkan oleh adanya beban-beban berat di atasnya seperti struktur bangunan sehingga lapisan-lapisan tanah dibawahnya mengalami kompaksi atau konsolidasi. Penurunan muka tanah ini sering juga disebut dengan *settlement*.
4. Penurunan muka tanah akibat pengambilan bahan padat dari tanah (aktifitas penambangan).

Penyebab *land subsidence* secara umum (disarikan dari beberapa literatur) disebabkan oleh:

1. Pengambilan air tanah yang berlebihan (Burbey J.T., 2005).
2. Penurunan karena beban bangunan (Quaxiang, 2001).
3. Konsolidasi alamiah lapisan tanah (Wei,Q., 2006).
4. Gaya-gaya tektonik (Chang, C.P., 2005).
5. Ekstraksi gas dan minyak bumi (Odijk, D., 2005).
6. Penambangan bawah tanah (Rizos, C., 2007).
7. Ekstraksi lumpur (Deguchi, T., 2007).
8. Patahan kerak bumi (Rahtje et al., 2003)
9. Konstraksi panas bumi di lapisan litosfer (Hamdani et al., 1994).

Land subsidence dapat akibat pengambilan air tanah yang berlebihan (*over pumpage*) dari lapisan akuifer yang tertekan (*confined aquifers*). Air tanah yang tersimpan dalam pori-pori lapisan penutup akuifer (*confined layer*) terperas keluar dan mengakibatkan penyusutan lapisan penutup tersebut.

Proses atau gerakan turunnya permukaan tanah telah banyak terjadi diberbagai wilayah di dunia terutama dikota-kota besar yang berlokasi dikawasan pantai atau dataran aluvial (endapan lepas yang tertransport ke tempat lain atau tidak berada disekitar batuan induk dimana berukuran butiran berupa pasir dan lempung), seperti: Bangkok-Thailand (Broms, 1992), Osaka-Jepang (Osaka City Government, 1995),

Tianjin-China (Hu et al., 2002), Yun-Lin-Taiwan (Chu and Sung, 2004), Hongkong (Liu et al., 2001), Antartika (Jezek et al., 1999), Banglades (Rahman, 1995), California-USA (Galloway et al., 1999), Jawa Timur-Indonesia (Deguchi et al., 2008), Jakarta-Indonesia (Hasannudin et al, 2007), Mexico (Allis et al., 1998), Singapura (Aritoshi et al., 2006), Kepulauan Aleutian-Salomon (Zhong Lu, 2007), Utah-USA (Chris Ukubo, 2002) dan Semarang-Indonesia (Marfai et al, 2002).

Selain itu, di Kota Shanghai (China) telah mengalami penurunan tanah yang disebabkan oleh eksploitasi air tanah yang terlalu banyak sejak tahun 1921, yang merupakan masalah serius bagi kota pesisir ini dengan ketinggian 2.2-4.8m di atas permukaan laut rata-rata. Penurunan tanah kumulatif terbesar sebesar 2,6 Juta di pusat kota.

V. METODA PENGUKURAN *LAND SUBSIDENCE*

Metode pengukuran *land subsidence* dapat dilakukan dengan cara teknik survey elevasi (*levelling*), *survey* GPS dan INSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

Dengan pengamatan GPS, perubahan posisi di permukaan bumi dapat ditentukan secara teliti dari waktu ke waktu hingga akurasi milimeter dengan bantuan pengamatan jarak ke satelit-satelit *positioning*. Perubahan posisi dalam arah sumbu z atau komponen vertikal dapat merepresentasikan penurunan tanah di lokasi yang kita pantau. Teknologi INSAR secara prinsipnya menentukan beda fasa gelombang satelit-satelit *interferometri*. Perbedaan fasa yang teliti dari waktu ke waktu yang dikonversikan ke komponen posisi dapat merepresentasikan penurunan tanah. Teknik dan teknologi lainnya yang dapat digunakan untuk memantau penurunan tanah yaitu sipat Datar teliti atau *waterpass*, *extensometer*, *micro gravity* dan lainnya.

Teknik INSAR pernah dipakai dalam studi pendahuluan penurunan tanah di Jakarta dengan menggunakan data SAR JERS-1. JERS-1/SAR memperoleh total tujuh belas skenario dari wilayah Jakarta selama periode 1993-1998. Untuk pengolahan INSAR, 41 pasangan gambar dipilih dan didaftarkan bersama, dan diproses menggunakan perangkat lunak VEXCEL 3D.

VI. DAMPAK PEMOMPAAN AIR TANAH BERLEBIHAN

A. Penurunan Muka Air tanah

Akibat pemompaan air tanah yang berlebih (*over pumping*) mengakibatkan penurunan muka air tanah yang berlebihan bula (*over draft*).

Saat pemompaan berlangsung, butiran tanah dibawah muka air tanah dapat terbawa sehingga terjadi penurunan tanah. Sebagai contoh di Jakarta, diketahui permukaan tanah di Jakarta menurun antara 4-8 cm per

tahunnya; maupun di Semarang terjadi penurunan tanah sebesar 11 cm/tahun sampai 15 cm/tahun dan mengakibatkan air laut menggenangi muka tanah saat rob (pasang).

Untuk menjaga kesetimbangan air, jumlah pemompaan air tanah harus seimbang dengan *recharge* (imbuhan air) yang masuk kedalam sumur atau *reservoir*.

B. Intrusi Air Laut

Intrusi air laut adalah pergerakan air laut (air asin) ke akuifer air tawar yang dapat mengkontaminasi sumber air minum. Intrusi air laut dapat terjadi secara alami hingga derajat tertentu pada sebagian besar akuifer pantai, dikarenakan adanya hubungan hidrolis antara air tanah dan air laut. Hal ini terjadi pada daerah pesisir laut.

Apabila ada aktifitas pemompaan air tanah yang berlebihan, air laut dapat menyusup lebih jauh ke arah daratan. Dengan kata lain, intrusi air laut lokasinya semakin menjauhi pantai menuju daratan, sehingga semula sumber air sumur dangkal berupa air tawar, berubah menjadi air asin akibat adanya intrusi air laut tersebut. Intrusi air laut sering terjadi di daerah padat penduduk dan daerah industri yang memanfaatkan air tanah di daerah pesisir seperti Jakarta, Semarang, Denpasar, Medan dan Surabaya

C. Land Subsidence

Permasalahan *land subsidence* (penurunan tanah dalam areal yang luas) dapat diakibatkan kegiatan pengambilan air tanah yang berlebihan dari lapisan *aquifer*, khususnya *aquifer* tertekan. Amblesan tanah tidak dapat dilihat seketika, namun dalam kurun waktu yang lama dan terjadi pada daerah yang luas, sehingga dapat mengakibatkan dampak negatif yang lain, antara lain:

- Banjir dan masuknya air laut ke arah darat pada saat pasang naik, sehingga menggenangi perumahan, jalan, atau bangunan lain yang lebih rendah.
- Menyusutnya ruang lintas pada kolong jembatan, sehingga mengganggu lalu lintas. Secara regional amblesan tanah mengakibatkan pondasi jembatan menurun dan mempersempit kolong jembatan. Berkurangnya kapasitas penyimpanan gudang dan terganggunya pelaksanaan arus bongkar atau muat barang.
- Rusaknya bangunan fisik seperti pondasi jembatan dan bangunan gedung tinggi, sumur bor, dan retaknya pipa saluran air limbah dan jaringan yang lain.

Gambar 1 menunjukkan peninggian lantai dermaga atau *jetty* dengan upaya membangun dinding penahan (*retaining wall*) sebagai penahan air laut saat pasang yang tingginya melebihi lantai dermaga atau *jetty existing*, akibat turunnya lantai dermaga atau *jetty* dampak adanya *land subsidence*.



Gambar 1. Dinding beton penahan air laut dipasang akibat terjadi penurunan *jetty* Pelabuhan Semarang yang disebabkan oleh *land subsidence*



Gambar 2. Beda tinggi lantai dermaga atau *jetty* lama dan baru

Gambar 2 menunjukkan beda tinggi antara *jetty* lama dan *jetty* baru, menyebabkan *rel container crane* tidak sama tinggi.

Gambar 3 menunjukkan bangunan masjid lama (sebelah kanan) yang telah turun hampir separuh tinggi bangunan dan sebelah kiri adalah bangunan masjid baru yang dibangun disebelahnya. Peristiwa *land subsidence* di areal pelabuhan Semarang sudah sedemikian ini parah.



Gambar 3. Penurunan sebuah masjid (kanan) di areal pelabuhan Semarang

D. Pencemaran Air Tanah

Pengambilan air tanah secara intensif juga berisiko pada pencemaran air tanah dalam yang bersumber dari air tanah dangkal (*unconfined aquifer*). Diketahui kualitas air tanah dalam lebih baik dari air tanah dangkal. Karena terjadi pencemaran, maka kualitas air tanah yang semula baik menurun dan bisa jadi tidak dapat dimanfaatkan ataupun dikonsumsi.

VII. MANAGEMENT GROUNDWATER (MANAGEMENT OF GROUNDWATER RESOURCES)

Management groundwater dimaksudkan untuk mengatur pemompaan air dalam suatu kawasan dengan tujuan untuk memperkecil dampak yang ditimbulkan oleh kelebihan pemompaan air tanah.

Management groundwater antara lain:

- Penentuan Lokasi Pemompaan,
- Pengaturan Kedalaman Penyadapan,
- Pembatasan Debit Pemompaan,
- Penambahan Imbuan (*recharge*),
- Penentuan Kawasan Lindung.

Untuk mengendalikan pemompaan air tanah agar tidak menyebabkan dampak negatif yang merugikan masyarakat antara lain:

1. Mengatur Lokasi Sumur Dalam (*Deep well*)

Lokasi sumur dalam sangat menentukan sekali terhadap dampak yang ditimbulkannya. Sudah dipahami bahwa daerah pengaruh pemompaan air tanah sangatlah luas. Letak sumur satu sama lainnya harus diperhitungkan dengan matang mengingat apabila daerah pengaruh saling berinterferensi maka sudah dipastikan bahwa penurunan muka air tanah (*draw-down*) akan jauh lebih dalam; sehingga pengaruhnya jelas lebih negatif dibandingkan letak sumur cukup berjauhan.

2. Menghindari *Over Pumping*

Akibat pemompaan air tanah yang terus menerus menyebabkan penurunan muka air tanah (*draw-down*) menjadi semakin membesar. Prinsip kesetimbangan neraca air, yaitu *inflow* (jumlah aliran yang menuju *aquifer*) adalah seimbang dengan *outflow* (jumlah air yang keluar dari *aquifer*). Dengan kata lain harus '*balance*'.

Storage capacity dari *aquifer* harus dipertahankan agar pemompaan air tanah yang dilakukan tidak mengganggu kapasitas *aquifer* yang ada. Hal yang penting diperhatikan adalah adanya *recharge area* yang memberikan imbuan sesuai dengan kesetimbangan *aquifer* sehingga volume air yang dipompa seimbang dengan air yang dimubuhkan kedalam *aquifer*.

Penurunan muka air (*draw down*) harus dibatasi supaya tidak terjadi '*over draft*' dimana mengakibatkan penurunan air tanah yang permanen dan berdampak negatif pada muka air

tanah (terutama muka air tanah dangkal, *unconfined aquifer*). Radius pengaruh penurunan muka air tanah cukup jauh (sekitar 3 km sampai dengan 4 km dari lokasi sumur).

Pengaturan lokasi sumur dalam mutlak diperlukan terutama pada kawasan industri yang mempergunakan air tanah sebagai bahan pokok industrinya.

3. Mempertahankan Kawasan *Recharge Air Tanah (Groundwater Recharge Area)*

Kesetimbangan siklus hidrologi akan terganggu apabila ketersediaan areal yang difungsikan sebagai daerah penyerapan atau infiltrasi air hujan berkurang tidak sesuai dengan luasan yang dibutuhkan. Kondisi lahan yang diperuntukkan sebagai '*groundwater recharge area*' harus dipertahankan fungsinya sehingga kondisi alam tidak terganggu apabila pemanfaatan air tanah masih dikehendaki oleh Pemerintah.

Penataan ruang harus cukup tegas menandai zona-zona manakah yang tidak diperbolehkan adanya alih fungsi. Pelanggaran terhadap Tata Ruang Wilayah yang sudah diplot sebagai *recharge area* mengakibatkan terganggunya ketersediaan sumber mata air dan lain sebagainya karena daerah infiltrasi air hujan menjadi berkurang.

Secara rinci, manajemen air tanah adalah:

- Areal dan distribusi temporal dari pompa,
- Areal dan temporal distribusi *artificial recharge*,
- Tinggi muka air di sungai dan danau yang bersentuhan dengan *aquifer*,
- Kualitas air yang akan digunakan untuk pengisian ulang buatan (*artificial recharge*),
- Kualitas air yang dipompa,
- Kapasitas instalasi baru untuk pemompaan atau pengisian ulang buatan (*artificial recharge*), lokasinya, dan jadwal waktu konstruksi diatur sedemikian rupa sehingga semua kendala hidrologi berikut terpenuhi:
 - Tinggi muka air dimanapun, atau di lokasi yang ditentukan, seharusnya tidak naik diatas elevasi maksimum yang ditentukan;
 - Tinggi muka air dimanapun, atau di lokasi yang ditentukan, jangan sampai jatuh di bawah elevasi minimum yang ditentukan;
 - Pengeluaran sumber air jangan sampai lebih rendah dibawah minimum;
 - Base flow* (aliran dasar) yang muncul dari *aquifer* tidak boleh turun di bawah minimum yang ditentukan;
 - Konsentrasi spesies tertentu dalam larutan di dalam air dipompa di lokasi yang ditentukan tidak boleh melebihi ambang batas;
 - Land subsidence tidak boleh melebihi nilai yang ditentukan;
 - Pompa total setidaknya harus memenuhi

- permintaan air di suatu daerah yang diberikan;
- h. Pumping (pengisian ulang buatan) tidak dapat melebihi jumlah yang terinstal kapasitas pemompaan (pengisian ulang buatan);
 - i. Waktu tinggal untuk mengisi ulang air dalam akuifer sebelum dipompa, harus melebihi periode minimum tertentu;
 - j. Panjang irisan air laut yang mengganggu seharusnya tidak melebihi suatu nilai yang ditentukan, dll.

VIII. KESIMPULAN

Penyebab *land subsidence* yang utama adalah pemompaan air tanah yang berlebihan (*over pumping*), penempatan sumur bor dalam (*deep well*) yang berdekatan.

Khusus untuk penurunan bangunan di area *land subsidence* kemungkinan besar diakibatkan adanya pembebanan pada permukaan tanah seperti penimbunan (reklamasi), bahkan kehandalan pondasi tiang yang menumpu beban struktur di atasnya kurang handal, misalkan sistem pondasi tiang '*friction pile*' masih mengakibatkan *settlement* lapisan tanah lunak dibawah ujung tiang meskipun daya dukung vertikal pondasi tiang cukup kuat.

Upaya meminimalkan pengaruh pemompaan air tanah antara lain melakukan langkah-langkah aman dalam pengaturan eksploitasi air tanah, mengubah *aquifer* pemompaan, dan meningkatkan pengambilan air *aquifer* alami yang digunakan untuk mengurangi penurunan tanah.

DAFTAR PUSTAKA

Abduh, Mohammed, 2012. "Studi Kapasitas Debit Air Tanah Pada Akuifer Tertekan Di Kota Malang". *Jurnal Teknik Pengairan* Vol. 3, Universitas Brawijaya.

Andreas, H., 2016, "Penurunan Tanah di Semarang Kian Mengkhawatirkan", *Tempo.co*, <https://indonesiana.tempo.co/read/83531/2016/07/28/heriandreas49/penurunan-tanah-di-semarang-kian-mengkhawatirkan>, Edisi Kamis 28 Juli 2016 (diakses 11 Juli 2017).

Bear, J., 2012, *Hydraulics of Groundwater*, New York :Dover Publications, Inc.

Hendrayana, H., 2002, *Dampak Pemboran Air Tanah*, Yogyakarta : Geological Engineering Dept., Faculty of Engineering, Gadjah Mada University.

Patric, 2016, *Akibat Dari Penggunaan Air Tanah Yang Berlebihan*, Jakarta : PT Tanindo Anugerah Nusantara. <http://tanindo.net/2016/12/07/akibat-dari-penggunaan-air-tanah-yang-berlebihan/> (diakses 14 Juli 2017).

Prawati, Eri, 2011. "Studi dan Permodelan Air Tanah Akibat Pengaruh Pemompaan (Studi Kasus Kelurahan Imopuro, Metro Pusat)". *Jurnal* Vol. 1, Lampung.

Soetrisno, S., 2000, *Pembatasan Pengambilan Air Tanah Berlandaskan Serahan Berkelanjutan*, Bandung. http://www.geocities.ws/Eureka/Gold/1577/batas_at.html (diakses 14 Juli 2017).

Todd D.K., 1980, *Groundwater Hydrology*, John Wiley & Sons, New York (hal. 363 -364).

USGS California Water Science Centre, 2017. *Causes & Effects of Land Subsidence*. www.landsubsidence.com August 21, 2017...12:30 am

Walton, W. C., 1970, *Groundwater Resource Evaluation*, Mc. Graw Hill Kogasukha, Ltd, Tokyo (hal. 375 -377).

Ye, S., Luo, Y. Q., Wu, J., Teatini, P., Wang, H., and Jiao, X., 2015, "Three Dimensional Numerical Modeling of Land Subsidence in Shanghai", *Proc of the International Association of Hydrological Sciences (Proceedings)* 372/443/2015, Shanghai, China, p.443-448.