

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menyajikan tinjauan literatur yang mendukung pengembangan analisis dan penyusunan tesis. Pembahasan dalam bab ini mencakup fenomena *land subsidence*, termasuk faktor penyebab, dampak, serta risiko bencana. Selain itu, dibahas pula metode pemantauan penurunan permukaan tanah menggunakan teknologi InSAR, studi kasus *land subsidence* di berbagai negara, termasuk Indonesia, kebijakan tata ruang dalam menghadapi ancaman *land subsidence*, serta kerangka teori dalam penelitian ini.

II.1 *Land Subsidence*

Penurunan permukaan tanah atau *land subsidence* merupakan sebuah fenomena pergerakan tanah secara vertikal ke bawah yang dapat dipicu oleh faktor alam maupun antropogenik (Abidin et al., 2013; Han et al., 2023; Shankar et al., 2024). Bencana ini memiliki karakteristik yang berbeda dengan bencana lainnya, karena dampaknya cenderung baru bisa dirasakan dalam jangka waktu panjang dan tidak secara langsung (Liu et al., 2023). Untuk mengamati fenomena penurunan permukaan tanah dibutuhkan data dari waktu ke waktu untuk melihat pola dari penurunan tanah (Liu et al., 2023). Secara umum, lokasi yang paling rentan terdampak *land subsidence* adalah perkotaan, pesisir, dan area pertanian yang dipicu dari berbagai faktor seperti faktor antropogenik penggunaan air tanah berlebih dan beban bangunan di permukaan tanah, serta faktor alami akibat kondisi litologi tanah lunak (Abidin et al., 2015).

II.1.1 Faktor Penyebab *Land Subsidence*

Kegiatan pengambilan air tanah yang dilakukan secara terus menerus menjadi salah satu faktor utama yang menyebabkan terjadinya fenomena penurunan permukaan tanah, sehingga kapasitas lapisan akuifer semakin berkurang dan menipis (Hasan et al., 2023). Data tentang ketersediaan air tanah digunakan untuk memantau kehilangan air tanah dengan memprediksi berkurangnya kapasitas lapisan akuifer, yang dapat menyebabkan penurunan permukaan tanah (Hasan et al., 2023). Penggunaan air tanah berperan besar sebagai faktor antropogenik menyebabkan penurunan tanah, yang terjadi karena kurangnya sumber air permukaan yang dapat

dimanfaatkan (Duan et al., 2022). Sebagai contoh, kegiatan pemompaan air tanah untuk aktivitas pertanian dan berbagai kebutuhan yang tidak dapat dipenuhi oleh air permukaan (Liu et al., 2023). Dari penelitian yang dilakukan (Hasan et al., 2023), penurunan permukaan tanah berkaitan erat dengan terjadinya penipisan lapisan akuifer.

Selain dari faktor pengambilan air tanah yang disebabkan oleh manusia, faktor lain secara alami seperti jenis tanah juga berpengaruh terhadap fenomena *land subsidence* (Chai et al., 2024). Menurut (Chai et al., 2024), faktor litologi tanah lunak dapat meningkatkan risiko penurunan tanah, karena tanah lunak cenderung memiliki karakteristik kandungan air yang tinggi, porositas atau rongga yang besar, dan kompresibilitas yang tinggi.

Faktor lain yang dapat menyebabkan penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) adalah kegiatan industri tambang berkelanjutan, yang bukan hanya memberikan dampak terhadap penurunan muka tanah, namun juga berdampak pada lingkungan, seperti berpotensi untuk memicu terjadinya longsor (Fadhillah et al., 2024). Sehingga penurunan tanah memiliki kaitan erat dengan penggunaan lahan yang ada di atas permukaan tanah (Fadhillah et al., 2024).

II.1.2 Dampak *Land Subsidence*

Secara umum, bencana berdampak pada berbagai aspek, termasuk sosial, fisik, ekonomi, dan lingkungan yang menjadi faktor utama dalam penilaian risiko bencana (Abidin et al., 2015). Menurut (Chai et al., 2024), untuk menghasilkan perencanaan kota yang lebih adaptif terhadap ancaman *land subsidence*, faktor kerentanan sosial, fisik, ekonomi dan lingkungan dapat diadopsi ke dalam kepadatan penduduk, kepadatan bangunan, kepadatan jalan, dan zona fungsional yang secara nyata berkontribusi dalam meningkatkan kerentanan dan dampak dari ancaman penurunan permukaan tanah (*land subsidence*).

Adanya *land subsidence* berdampak signifikan terhadap lingkungan, infrastruktur dan kehidupan manusia (Hussain et al., 2022). Secara fisik, penurunan muka tanah dapat menyebabkan kerusakan pada berbagai fasilitas, seperti bangunan, jalur kereta api dan jalan raya (Ku & Liu, 2023). Kerusakan ini sering ditandai dengan

munculnya retakan atau celah antara struktur dan permukaan tanah. Selain itu, *land subsidence* juga berpengaruh terhadap perencanaan dan pengembangan kota, sehingga memerlukan strategi mitigasi yang komprehensif (Duan et al., 2022).

Abidin et al. (2015) dan Shankar et al. (2024) merinci beberapa dampak utama yang ditimbulkan oleh *land subsidence*, antara lain:

1. Infrastruktur, mengakibatkan retakan pada bangunan dan jalan, kemiringan serta penurunan elevasi bangunan, tenggelamnya struktur bangunan, kerusakan pada jaringan pipa, dan kegagalan fungsi sistem drainase.
2. Lingkungan, dapat berdampak pada perubahan arah aliran drainase, banjir pada kawasan pesisir yang terdampak penurunan permukaan tanah, dan memperluas area banjir.
3. Ekonomi, berdampak pada peningkatan biaya perawatan untuk infrastruktur yang rusak, penurunan harga lahan dan properti, bangunan dan fasilitas yang ditinggalkan, serta gangguan kegiatan ekonomi.
4. Sosial, berdampak pada penurunan kualitas lingkungan hidup

Berikut (Gambar II.1) merupakan visualisasi contoh dampak kerusakan yang ditimbulkan oleh penurunan muka tanah terhadap berbagai fasilitas (Liu et al., 2023):



Gambar II. 1 Contoh Dampak Kerusakan *Land Subsidence* (I)
(Liu et al., 2023)

Gambar (a) hingga (j) memperlihatkan contoh kerusakan yang disebabkan oleh *land subsidence*, mulai dari (a, b, g, i, j) retakan pada fasilitas bangunan atau beton, (e dan f) penurunan permukaan tanah, (c dan h) tampak sekat yang berjarak antara fasilitas dengan permukaan tanah, serta (d) kerusakan pada jaringan jalan. Dalam penelitian lain yang dilakukan oleh (Abidin et al., 2013), memberikan beberapa contoh kerusakan yang diakibatkan oleh penurunan permukaan tanah (lihat Gambar II.2).



Gambar II. 2 Contoh Dampak Kerusakan *Land Subsidence* (II)
(Abidin et al., 2013)

Dari gambar di atas, dapat dilihat beberapa dampak yang ditimbulkan dari pengaruh *land subsidence* seperti kondisi (a) tanah yang turun di Dayeuh Kolot menyebabkan bangunan rumah yang berada di atasnya ikut mengalami penurunan atau ambles, (b) kerusakan pada jaringan jalan di Cimahi Selatan akibat permukaan tanah yang tidak rata dari penurunan permukaan tanah, (c) pengangkatan jalan di Kecamatan Gedebage akibat amblesan penurunan permukaan tanah, (d) amblesan rumah di Kecamatan Gedebage, (e) amblesan rumah di Cimahi Selatan, (f) serta dapat menimbulkan banjir yang lebih luas dan dalam.

(Dong et al., 2023), menjelaskan bahwa adanya penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) bukan hanya dapat memicu kerusakan sarana dan prasarana, ternyata juga dapat meningkatkan risiko terhadap bencana banjir. Sehingga ancaman penurunan tanah ini dapat memperparah kondisi *hazard* lain seperti banjir (Dong et al., 2023).

II.1.3 Risiko Bencana *Land Subsidence*

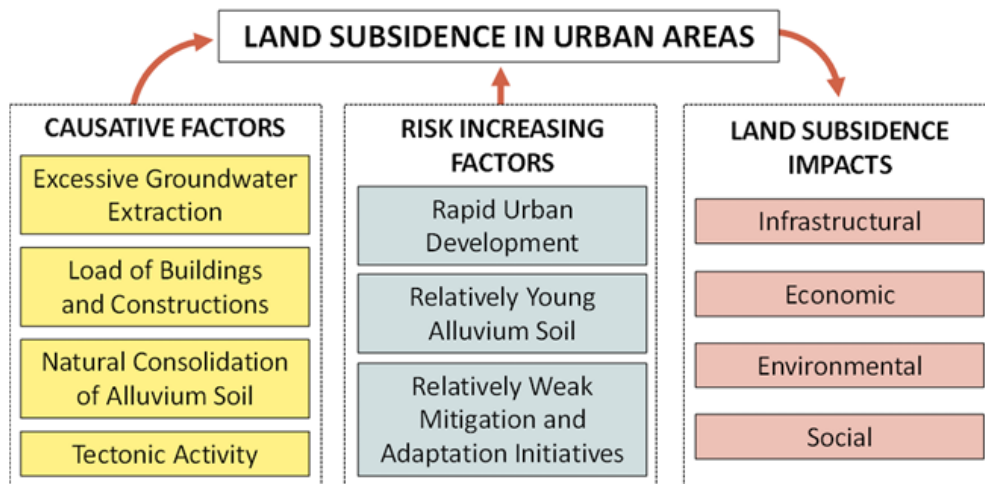
Menurut Undang-Undang Penanggulangan Bencana No. 24 Tahun 2007, bencana adalah sebuah atau rangkaian peristiwa yang mengganggu kehidupan masyarakat, yang disebabkan oleh faktor alam atau antropologi, sehingga berakibat pada kerugian dalam bentuk harta benda, dampak psikologis, dampak kerusakan lingkungan, bahkan menimbulkan korban jiwa (UU No.24 Tahun, 2007).

1. *Land Subsidence Risk*

Dalam dokumen Risiko Bencana Indonesia (RBI) tahun 2023, metode kajian risiko bencana dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak negatif bencana (BNPB, 2023). Sedangkan menurut (UNDRR, 2024), risiko bencana adalah segala bentuk kemungkinan yang dapat terjadi pada masyarakat, komunitas ataupun sistem dalam jangka waktu tertentu memungkinkan terjadinya kerusakan pada aset, cedera atau bahkan kematian.

Secara umum rumusnya dapat diformulasikan dengan $Risk = Hazard \times Vulnerability$ atau ditambahkan indikator pembagi *Capacity* untuk melihat kemampuan dalam menghadapi bencana tersebut (BNPB, 2023). Potensi dari dampak negatif yang mungkin ditimbulkan oleh bencana, dapat dilihat dengan mempertimbangkan tingkat kerentanan (*vulnerability level*), sedangkan dalam konsep tata ruang, hal yang dapat dilakukan untuk meminimalisir dampak dari bencana adalah dengan melakukan upaya peningkatan kapasitas terhadap bahaya ataupun kerentanan (BNPB, 2023).

Khususnya pada kawasan *urban area* faktor penyebab *land subsidence*, faktor yang dapat meningkatkan risiko dan dampak penurunan tanah diidentifikasi dalam penelitian Abidin et al., (2015) (lihat Gambar II. 3):



Gambar II. 3 *Causative factors, risk increasing factors dan impact of land subsidence* (Abidin et al., 2015)

Keberadaan ancaman *land subsidence* di perkotaan dapat meningkatkan risiko karena beberapa faktor, seperti pembangunan perkotaan yang pesat, tanah aluvium yang relatif muda atau tanah lunak, dan masih rendahnya upaya dalam melakukan tindakan mitigasi dan adaptasi terhadap ancaman tersebut. *Land subsidence* dapat berdampak pada kerusakan infrastruktur, kerusakan lingkungan, gangguan ekonomi dengan peningkatan pemeliharaan pada berbagai fasilitas yang rusak, serta dampak sosial (Abidin et al., 2015).

2. *Land Subsidence Hazard*

Land subsidence merupakan jenis bahaya geologi, berdasarkan penelitian (Chai et al., 2024), bahaya *land subsidence* adalah kemungkinan yang dapat menimbulkan terjadinya penurunan permukaan tanah. Beberapa indikator yang dapat menjadi indeks bahaya *land subsidence*, yaitu:

- *Cenozonic thickness*, lapisan ini merupakan lapisan bumi yang terbentuk pada era kenozoikum, lapisan cenozoikum yang lebih tebal dapat meningkatkan risiko penurunan permukaan tanah (*land subsidence*).
- *Aquifer thickness* dan *groundwater level drawdown line*, penurunan tanah dapat disebabkan oleh faktor pengambilan air tanah yang berlebihan, sehingga mengakibatkan lapisan akuifer lebih tertekan dan mempengaruhi penurunan

permukaan tanah. Indikator ini menjadi faktor sekunder yang menjadi penyebab penurunan permukaan tanah.

- *Rate of land subsidence* dan *cumulative surface subsidence volume* secara langsung menggambarkan intensitas terjadinya penurunan permukaan tanah.
- *Thicknes of soft soil*, tanah lunak yang lebih tebal memiliki potensi dalam meningkatkan terjadinya penurunan tanah. Dengan ciri tanah lunak memiliki kandungan air alami yang tinggi, kompresibilitas, memiliki kekuatan geser yang secara langsung memiliki hubungan atau korelasi dengan penurunan atau amblesan tanah.

3. *Land Subsidence Vulnerability*

Kerentanan (*vulnerability*) dalam penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) berhubungan dengan tingkat kerentanan individu, masyarakat, dan properti terhadap ancaman atau kerusakan akibat *land subsidence* (Chai et al., 2024). Menurut (Chai et al., 2024), untuk menghasilkan rencana kota yang lebih baik, khususnya terhadap ancaman *land subsidence* secara spasial dapat dilakukan dengan mengadopsi indeks kerentanan yang merepresentasikan secara komprehensif kerentanan sosial, ekonomi, fisik, dan lingkungan terhadap indeks kerentanan *land subsidence* di kawasan *urban development*, sebagai berikut:

• *Population Density*

Dari aspek sosial kependudukan yang ditinjau berdasarkan kepadatan penduduk, semakin tinggi tingkat kepadatan penduduk, semakin besar pula jumlah penduduk yang berpotensi terdampak. Kerentanan terhadap penduduk dapat meningkat akibat tekanan yang dipicu oleh kerusakan yang terjadi. Selain itu, tingginya kepadatan bangunan penduduk juga berkontribusi pada meningkatnya risiko penurunan tanah, yang disebabkan oleh berbagai faktor seperti penggunaan air tanah berlebih, pembangunan dengan beban berat, serta aktivitas lain yang dapat memicu penurunan tanah.

- ***Building density***

Semakin padat bangunan maka semakin tinggi kemungkinan kerugian akibat kerusakan yang ditimbulkan penurunan tanah terhadap bangunan, serta kepadatan bangunan dapat memicu peningkatan kerentanan dari segi banyaknya bangunan yang menekan permukaan tanah memicu penurunan permukaan tanah.

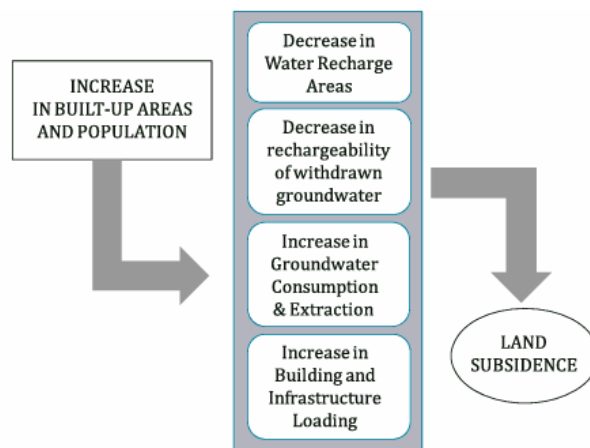
- ***Road Density***

Selain akan memicu kerusakan pada jaringan jalan, semakin padat jaringan jalan maka kerusakan akibat penurunan tanah juga akan semakin tinggi karena pembangunan akan condong pada kawasan dengan kemudahan aksesibilitas. Jalan atau jaringan transportasi dianggap dapat memperburuk kondisi penurunan permukaan tanah karena dapat meningkatkan risiko kerusakan jaringan jalan, jaringan jalan yang padat sering kali memiliki infrastruktur yang terkonsentrasi, serta peningkatan biaya perbaikan.

- ***Functional Zone***

Dengan mempertimbangkan penggunaan lahan, fungsi yang beragam akan memberikan dampak yang beragam, memungkinkan dampak pada berbagai kegiatan ekonomi dan sosial yang beragam, semakin penting zona tersebut maka semakin tinggi kerugian dari dampak penurunan tanah yang bisa dilihat dari zona kawasan lindung dan budidaya dari pola ruang.

Indeks kerentanan di atas yang dilakukan oleh (Chai et al., 2024) secara spasial merujuk pada berbagai peningkatan yang terjadi pada pembangunan perkotaan. Teori (Chai et al., 2024) diperkuat dengan teori (Abidin et al., 2011) terhadap indeks kerentanan *land subsidence*. Hubungan antara *urban development* dengan *land subsidence* menurut (Abidin et al., 2011), yang diambil dari studi kasus penurunan permukaan tanah di Kawasan Pesisir Kota Jakarta seperti pada (Gambar II.4) berikut:



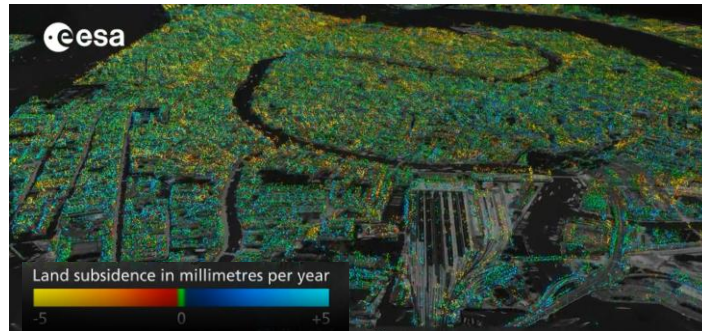
Gambar II. 4 Hubungan antara Peningkatan Area Terbangun dan Populasi terhadap *Land Subsidence*
(Abidin et al., 2011)

Peningkatan pembangunan dan populasi akan memicu peningkatan penggunaan sumber daya yang dapat berdampak pada penurunan area yang dapat melakukan pengisian ulang air tanah yang disebabkan *catchment area* yang tertutup oleh pembangunan, kemudian terjadi penurunan kemampuan pengisian ulang air tanah yang diambil, terjadi peningkatan konsumsi dan ekstraksi air tanah, serta peningkatan beban bangunan dan infrastruktur. Berbagai peningkatan tersebut, berhubungan erat dalam kontribusinya mengakibatkan atau mempercepat penurunan permukaan tanah. Berdasarkan hasil penelitian (Ramadhanty et al., 2024), penggunaan air tanah berpengaruh 21% terhadap penurunan permukaan tanah (*land subsidence*).

II. 2 Pemantauan Penurunan Permukaan Tanah Menggunakan Teknologi InSAR

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) merupakan teknologi *monitoring* yang mampu mendeteksi fenomena penurunan tanah dalam skala akurasi hingga milimeter per tahun (Hasan et al., 2023). Teknologi ini memanfaatkan satelit Sentinel-1, yang menjadi cara untuk melacak fenomena penurunan tanah dan kerusakan secara struktural (Hasan et al., 2023). Satelit ini mampu untuk memantau pergerakan tanah yang sulit dideteksi secara kasat mata atau bahkan tidak terlihat dalam kehidupan sehari-hari (European Space Agency (ESA), 2024). Hal ini menjadi alat yang memudahkan perencanaan kota untuk

melakukan perencanaan kota melalui kajian risiko penurunan tanah (European Space Agency (ESA), 2024).



Gambar II. 5 Pemantauan Penurunan Tanah Menggunakan InSAR Sentinel-1 (European Space Agency (ESA), 2024)

Gambar II.5 di atas merupakan contoh pemantauan penurunan tanah dengan menggunakan Sentinel-1 yang memberikan informasi penurunan tanah dengan akurasi hingga skala milimeter per tahunnya. Teknologi ini telah banyak dilakukan dalam penelitian dengan data yang digunakan diperbarui setiap hari (European Space Agency (ESA), 2024). Pengamatan penurunan permukaan tanah dengan *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) telah terbukti dapat memberikan akurasi penurunan tanah yang banyak digunakan untuk pemantauan penurunan permukaan tanah (Hasan et al., 2023).

Teknologi *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) menggunakan data Sentinel-1 yang mampu menyediakan data mengenai kondisi permukaan bumi dan perubahan elevasi tanah melalui teknologi radar penginderaan jauh (European Space Agency (ESA), 2024) Satelit ini bekerja dengan memantau serta memetakan permukaan bumi melalui pengumpulan citra-citra, yang memungkinkan analisis terhadap laju deformasi tanah (European Space Agency (ESA), 2024). Sentinel-1 memiliki kemampuannya untuk tetap menghasilkan data meskipun area yang diamati tertutup vegetasi atau berada dalam kondisi cuaca buruk. (Fadhillah et al., 2024).

II.3 Preseden Fenomena *Land Subsidence*

Secara global, penurunan permukaan tanah akibat penurunan air tanah yang signifikan terjadi di berbagai wilayah, termasuk di beberapa negara Eropa seperti

Amerika, Spanyol, Italia, Prancis, Hungaria, dan Yunani, yang menunjukkan dampak serius terhadap sumber daya air dan infrastruktur mereka. (Hasan et al., 2023). Di Amerika Utara penurunan permukaan tanah cukup signifikan terjadi di Texas, California, Mexico, dan Arizona (Hasan et al., 2023). Sedangkan pada Asia Timur, penurunan tanah dapat ditemukan di beberapa negara seperti Tiongkok, Taiwan, Vietnam, dan Filipina (Hasan et al., 2023). Pada Negara Tiongkok penurunan tanah terjadi di sepanjang pesisir kota-kota besar, seperti Beijing, Wuhan, Shanghai, Xian dan Tianjin (Hasan et al., 2023). Kemudian di negara-negara Asia Selatan, Asia Tengah, dan Asia Timur Tengah juga terindikasi mengalami penurunan permukaan tanah yang tinggi, seperti Bangladesh, Myanmar, India, Pakistan, Iran, Turki, dan Indonesia (Hasan et al., 2023). Berikut beberapa contoh negara atau kota yang mengalami ancaman penurunan permukaan tanah (*land subsidence*):

II.3.1 Preseden *Land Subsidence* di Mancanegara

II.3.1.1 Amerika

Beberapa wilayah di Amerika mengalami *land subsidence* disebabkan oleh *over-pumping water of aquier* yang berbanding lurus dengan jumlah penduduknya yang semakin meningkat (USGS, 2018). Contoh wilayah yang mengalami fenomena *land subsidence* di Amerika Serikat adalah Las Vegas, San Joaquin Valley, sepanjang area pantai California, Santa Clara Valley, Texas, dan Arizona. Di Las Vegas, Nevada, *land subsidence* menimbulkan kerusakan pada berbagai fasilitas seperti pada bangunan dan fasilitas lainnya (Tzampoglou et al., 2023). Kerusakan di Las Vegas ditunjukkan pada (Gambar II.6).



Gambar II. 6 Dampak *Land Subsidence* di Las Vegas, Nevada, Amerika (Tzampoglou et al., 2023)

Gambar di atas, menggambarkan dampak yang terjadi di Las Vegas akibat penurunan permukaan tanah atau *land subsidence*. Pada gambar (a) fenomena ini terlihat melalui ilustrasi pipa bor yang tampak seperti terangkat ke permukaan. Namun, yang sebenarnya terjadi adalah penurunan permukaan tanah di sekitar pipa tersebut, sehingga menciptakan kesan pipa tersebut terangkat. Selain itu, pada gambar (b) *land subsidence* menyebabkan permukaan tanah menjadi tidak rata, memicu kerusakan pada infrastruktur bangunan rumah. Dampak ini mencerminkan betapa seriusnya konsekuensi dari penurunan permukaan tanah terhadap keberlanjutan wilayah perkotaan dan infrastruktur di daerah yang terdampak.

Fenomena penurunan permukaan tanah yang signifikan juga terjadi di San Joaquin Valley, California, yang disebabkan oleh penggunaan air tanah untuk kebutuhan pertanian intensif, telah mengakibatkan deformasi vertikal hingga 9 meter pada sekitar 13.000 km² lahan, yang berpotensi mengganggu kestabilan lahan pertanian dan produksi pangan di wilayah tersebut (Tzampoglou et al., 2023). Gambar II.7 merupakan perkiraan penurunan permukaan tanah di San Joaquin Valley akibat penggunaan air tanah:



Gambar II. 7 Gambar Perkiraan Penurunan Tanah di San Joaquin Valley, California, Amerika Tahun 1925-1977
(United States Geological Survey (USGS) in Tzampoglou et al., 2023)

Gambar tersebut menunjukkan perkiraan deformasi maksimum akibat penurunan tanah di Lembah San Joaquin selama periode 1925-1977. Penurunan ini terjadi akibat penggunaan air tanah secara intensif untuk keperluan pertanian. Fenomena ini menyebabkan penurunan tanah yang signifikan, mencapai sekitar 9 meter, sehingga menimbulkan kekhawatiran di kalangan pemerintah.

Untuk mengatasi masalah penurunan permukaan tanah di San Joaquin Valley, California, Amerika, pada tahun 1960-an, pemerintah setempat meluncurkan proyek pemanfaatan air permukaan sebagai alternatif. Langkah ini, terbukti berhasil mengurangi tingkat penurunan tanah secara signifikan, dengan penurunan berkurang hingga 50-70% (Tzampoglou et al., 2023).

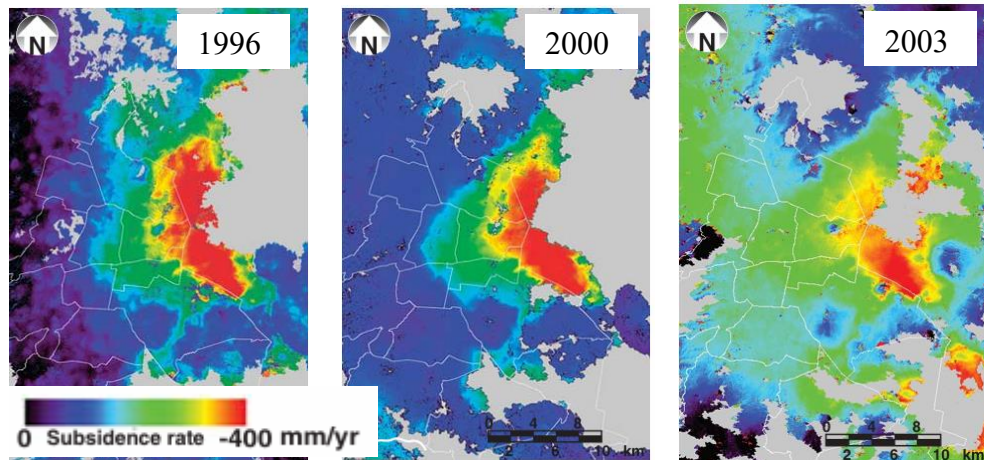
II.3.1.2 Meksiko

Fenomena penurunan permukaan tanah yang terjadi di Kota Meksiko pertama kali disadari pada akhir abad ke-18, dengan penurunan tanah sebesar sekitar 40 cm per tahun (Cabral-Cano et al., 2008). Fenomena ini menimbulkan dampak serius terhadap infrastruktur kota, termasuk kerusakan pada bangunan-bangunan serta gangguan pada jaringan transportasi (Solano-Rojas et al., 2024). Penurunan permukaan tanah yang terus berlanjut memperburuk kondisi kota, mempengaruhi kestabilan struktur bangunan, dan mengancam kelancaran sistem transportasi yang vital bagi kehidupan sehari-hari penduduk (Tzampoglou et al., 2023).

Di Kota Meksiko, 70% air tanah merupakan sumber air yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan 112 juta penduduk, akibatnya terjadi penurunan sumber daya air dan peningkatan risiko penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) (Chaussard et al., 2014). Kota Meksiko menjadi *center* dari berbagai kegiatan seperti budaya, ekonomi dan industri dengan kondisi kota yang berdiri di atas tanah dengan jenis endapan aluvial (Tzampoglou et al., 2023).

Telah banyak penelitian di Kota Meksiko yang menunjukkan bukti adanya penurunan tanah yang terjadi dengan berbagai metode, salah satunya dengan penggunaan teknologi seperti InSAR (Cabral-Cano et al., 2008; Yan et al., 2012). Berikut (Gambar II.8) merupakan peta penurunan permukaan tanah Kota Meksiko

yang telah dipantau dari tahun 1996 sampai tahun 2003 menggunakan teknologi InSAR :



Gambar II. 8 Perubahan Penurunan Tanah di Kota Meksiko Tahun 1996, 2000, dan 2003 Menggunakan Teknologi InSAR (Cabral-Cano et al., 2008)

Gambar II.8 di atas menunjukkan perubahan penurunan permukaan tanah yang terjadi di Kota Meksiko dalam periode tujuh tahun, yaitu pada tahun 1996, 2000, dan 2003, yang menggambarkan semakin meluasnya area terdampak penurunan permukaan tanah dan mencapai penurunan tanah 400 mm/tahun atau 40 cm/tahun. Fenomena ini menunjukkan adanya penurunan permukaan tanah yang signifikan dari tahun ke tahun, yang akan berdampak pada stabilitas infrastruktur dan sumber daya air di kota yang juga akan meluas. Gambaran terhadap dampak penurunan permukaan tanah yang terjadi di Kota Meksiko dapat dilihat pada Gambar II.9.





Gambar II. 9 Dampak *Land Subsidence* di Kota Meksiko
(Hidrologi Group. FIU Geodesi Lab in in Tzampoglou et al., 2023)

Dari penurunan tanah yang terjadi di Meksiko berdampak pada (a) penurunan permukaan tanah yang memperlihatkan perbedaan ketinggian permukaan tanah dan jalan, (b) kerusakan pada konstruksi bangunan akibat retakan, (c) yang menunjukkan kerusakan pada fasilitas jaringan pendukung dan (d) yang menunjukkan kerusakan pada *pedestrian way* .

II.3.1.3 Tiongkok

Dataran Tiongkok diindikasi mengalami penurunan permukaan tanah sejak pertengahan abad ke-20 (Ye et al., 2015). Penurunan tanah yang terjadi sebagai akibat dari penggunaan air tanah yang berlebihan untuk berbagai kegiatan seperti *agricultural*, *industrial*, dan pemenuhan kebutuhan air penduduk (Ye et al., 2015). Dengan catatan laju penurunan permukaan air tanah mencapai 15,1 miliar m³ antara tahun 2001 dan 2002 (Tzampoglou et al., 2023). Penurunan permukaan tanah yang terjadi di dataran China terjadi pada hampir 80% kota-kota di *costal zone* seperti Shanghai, Beijing, Kota Suzhou, Kota Wuxi, Kota Changzhou, Kota Tianjin, Kota Shian, dan Provinsi Hebei (Tzampoglou et al., 2023).

Penurunan tanah yang terjadi di Tiongkok, terlihat penurunan tanah yang signifikan terjadi di kawasan pesisir pantai, terutama pada beberapa kota yang mengalami *land subsidence* > 2 meter seperti di Taiwan, Shanghai, dan Tianjin (Fang et al., 2022). Penurunan tanah yang terjadi di Tiongkok mestinya menjadi pertimbangan dalam

rencana tata ruang mengingat jumlah penduduk yang terus meningkat akan semakin meningkatkan risiko bencana penurunan permukaan tanah terutama pada kawasan pesisir.

Akumulasi penurunan ini telah menyebabkan permukaan tanah di Shanghai mengalami penurunan signifikan, berkisar antara 1,92 meter hingga 2,9 meter (Tzampoglou et al., 2023). Penelitian lain (Fang et al., 2022), mengungkapkan bahwa penurunan muka tanah di pesisir Shanghai, salah satu kawasan utama yang menjadi perhatian di Tiongkok memicu terjadinya *colateral hazard* lain seperti banjir dan diproyeksi akan memperburuk risiko banjir, dengan estimasi perubahan luas area genangan banjir mencapai 64.000 km² hingga 74.000 km² pada tahun 2050 (Fang et al., 2022). Adapun upaya yang dilakukan untuk mengantisipasi permasalahan banjir yang disebabkan oleh penurunan permukaan tanah di kawasan pesisir dilakukan pemanfaatan tanggul (Lixin et al., 2010). Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan, dengan adanya pengendalian penurunan tanah biaya untuk kerusakan berkurang 22-47% dan biaya perlindungan berkurang 74-89% (Fang et al., 2022).



Gambar II. 10 Dampak *Land Subsidence* di Kota Tianjin, Tiongkok
(Lixin et al., 2010)

Gambar II.10 di atas menunjukkan dampak penurunan permukaan tanah yang terjadi di Kota Tianjin, Tiongkok. Gambar (a) menunjukkan kerusakan pada *water supply system* yang menyebabkan beton *water supply system* memiliki sekat antara permukaan tanah, sedangkan gambar (b) menunjukkan dampak banjir sebagai akibat penurunan tanah di kawasan Pesisir Kota Tianjin. Khusus untuk menghadapi ancaman penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) (Lixin et al., 2010), menyarankan untuk dilakukan teknik penghematan penggunaan air tanah,

mengganti sumber daya air, pengisian ulang air tanah, serta penelitian dan pemantauan kerusakan konstruksi.

II.3.2 Preseden *Land Subsidence* di Indonesia

II.3.2. 1 DKI Jakarta

Indonesia dikenal sebagai salah satu negara yang menghadapi ancaman penurunan permukaan tanah (*land subsidence*), khususnya wilayah perkotaan bagian barat yaitu DKI Jakarta (Duan et al., 2022). DKI Jakarta telah mengalami fenomena penurunan tanah dari waktu ke waktu, disebabkan oleh pengaruh pengambilan air tanah berlebih untuk memenuhi kebutuhan masyarakat yang terus meningkat sebagai dampak urbanisasi. Ancaman *land subsidence* yang terjadi di Kota Jakarta, bahkan diteliti berpotensi tenggelam karena kondisi permukaan laut yang lebih tinggi dari pada permukaan tanah. Untuk menghadapi ancaman tersebut pemerintah merencanakan pemindahan ibukota ke Pulau Kalimantan (Herrera-Garcia et al., 2021).

Jakarta diidentifikasi mengalami penurunan tanah yang sangat signifikan karena faktor antropogenik, berupa pengambilan air tanah, selain itu hal ini juga diperburuk dengan jenis tanah berupa endapan aluvial holosen di bagian utara Pulau Jawa (Agustan et al., 2021). Pemantauan dalam kurun waktu 37 tahun dari tahun 1974-2010, telah menunjukkan perluasan area terdampak dan kedalaman penurunan tanah, serta terdapat beberapa lokasi di Pesisir Kota Jakarta yang mengalami penurunan tanah hingga 4 meter (Abidin et al., 2015)

Dari fenomena penurunan permukaan tanah yang terjadi di Jakarta mengakibatkan beberapa dampak yang dapat dilihat. Dari penelitian (Abidin et al., 2015), menunjukkan beberapa dampak fisik dari penurunan permukaan tanah, seperti menyebabkan miringnya struktur bangunan, tenggelamnya bangunan, tenggelamnya tanggul, penurunan struktur jembatan, mal fungsi drainase, serta dapat menyebabkan banjir pada kawasan pesisir (Abidin et al., 2015).

Penelitian lain (Marwanza et al., 2023), terkait dengan bukti terjadinya penurunan permukaan tanah di Jakarta dengan dampak secara nyata kerusakan pada

infrastruktur jalan, kereta, bangunan, serta berdampak pada peningkatan risiko banjir. Penurunan tanah yang terjadi di Kota Jakarta berdasarkan observasi dan penelitian (Marwanza et al., 2023), menunjukkan adanya penurunan permukaan tanah yang terjadi di sekitar Jalan Pintu Besar Selatan Kota Jakarta, dengan menunjukkan perbedaan ketinggian titik A dan Titik B yang diindikasikan, bahwa titik A mengalami penurunan permukaan tanah. Penurunan tanah yang terjadi di Kota Jakarta dapat menjadi beban bagi pengembangan berkelanjutan perkotaan, sehingga diperlukan beberapa upaya baik mitigasi maupun adaptasi dari dampak penurunan tanah. Saat ini, upaya mitigasi yang dapat dilakukan berdasarkan faktor penyebab dan dampak penurunan tanah yang terjadi di Kota Jakarta adalah pengendalian sistem banjir, membuat kebijakan untuk mengatur penggunaan air tanah, serta pembentukan petugas khusus pemantauan pencegahan penurunan tanah (Marwanza et al., 2023)

II.3.2. 2 Kota Semarang

Kota Semarang, Ibukota Provinsi Jawa tengah yang terletak tepat pada pesisir utara Pulau Jawa dengan luas wilayah 375 Km² mengalami fenomena *land subsidence* yang menimbulkan ancaman pada manusia dan menyebabkan kerusakan yang parah dan peningkatan biaya akibat kerusakan berbagai infrastruktur perkotaan seperti kerusakan pada bangunan, jalan, dan jalur kereta api, yang juga mengakibatkan semakin parahnya kondisi banjir yang semakin sering terjadi dan mempengaruhi kehidupan penduduk, terutama masyarakat miskin kota (Kuehn et al., 2010). Fenomena *land subsidence* di kota ini dapat ditemui pada area pantai dengan sedimen laut dan sedimen aluvial (Kuehn et al., 2010).

Penurunan tanah yang terjadi di Kota Semarang mencapai 10,5 – 13,5 cm/tahun sedangkan penurunan tanah yang paling rendah sekitar 1,1– 2,2 cm/tahun (Irawan et al., 2021). Dari adanya penurunan tanah yang terjadi di Kota Semarang, memicu berbagai dampak fisik yang dapat dilihat. Untuk dampak penurunan tanah yang terjadi di Kota Semarang dapat dilihat pada Gambar II.11 dan Gambar II.12.



Gambar II. 11 Dampak *Land Subsidence* di Kota Semarang (I)
(Kuehn et al., 2010)

Dampak dari penurunan tanah yang terjadi di Kota Semarang dapat digambarkan pada Gambar II.11. Pada gambar (a) merupakan fenomena penurunan tanah yang sangat *extreme* di dekat Pelabuhan tepatnya di kawasan industri yang menunjukkan rumah yang tampak tenggelam, (b) dilakukan upaya peninggian tanah untuk menjaga area yang terdampak dari penurunan tanah tetap kering, namun rumah yang tidak mampu melakukan peninggian bangunan menjadi semakin lebih rendah dari jalan, (c) rambu jalan yang menunjukkan penimbunan dengan upaya untuk meninggikan permukaan, (d) lahan rel kereta api yang terbenkakai karena banjir yang menggenang sebagai pengaruh dari penurunan tanah.

Salah satu dampak yang terjadi di Kota Semarang sebagai dampak dari *land subsidence* adalah adanya kemungkinan banjir yang merendam sebagian wilayah yang ada di bagian utara kota ini (*costal area*), yang berdasarkan penelitian lebih lanjut pada tahun 2050 sebagai dampak dari *sea level rise* dan ditambah dengan adanya *land subsidence* akan merendam kawasan kota ini dengan tingkat *low* dari 1 km² menjadi 4 Km², kemudian *moderate* dari 1 Km² menjadi 3,3 Km², lalu *significant* dari 0,3 Km² menjadi 6,3 Km², dan tingkat *extreme* dari 0,004 Km² meningkat menjadi 8,5 km², yang jika tidak diatasi dengan segera akan berdampak pada biaya adaptasi dan mitigasi yang akan terus meningkat (Irawan et al., 2021)

Dampak lain dari penurunan permukaan tanah yang ditemukan di Kota Semarang adalah aset bangunan yang ditinggalkan karena kerusakan properti dan banjir yang

terjadi karena *land subsidence*. (Gambar II.12) merupakan contoh gambaran dampak aset yang ditinggal karena *land subsidence* di Kota Semarang



Gambar II. 12 Dampak *Land Subsidence* di Kota Semarang (II)
(Andreas et al., 2017)

Dampak penurunan tanah yang terjadi di Kota Semarang saat ini tidak lepas dari pengaruh litologi yang disebabkan oleh adanya pemadatan sedimen laut dan *alluvial* yang mengandung lempung dan prosesnya menjadi lebih cepat karena penggunaan air tanah berlebih yang tidak terkontrol (Kuehn et al., 2010). Sedangkan berdasarkan litologinya, kota ini memiliki 3 unit jenis litologi, yaitu batu gunung api formasi damar yang berada di sebelah selatan dan barat kota ini, kemudian sedimen laut di sebelah utara, serta endapan aluvial yang juga berada di sebelah utara kota ini (Kuehn et al., 2010). Batuan gunung api terdiri atas susunan material lava, *tuff*, batuan vulkanik atas breksi vulkanik, batu pasir dan batu lempung, sedimen laut terdiri atas batu lempung dan berseling dengan batu pasir, sedangkan endapan aluvial terdiri atas tanah liat dan pasir yang memiliki ketebalan 80 meter lebih (Kuehn et al., 2010). Penggunaan air tanah berlebihan dan pengaruh litologi di kota ini menyebabkan penurunan muka air secara cepat sehingga memicu pengeringan lapisan tanah liat yang berakibat pada penurunan tanah sekitar 15 cm/tahun hingga lebih (Kuehn et al., 2010).

Kejadian penurunan tanah yang terjadi di Kota Semarang jika terus berlanjut akan berdampak parah pada sebagian besar dari wilayah Kota Semarang yang akan terendam banjir khususnya pada area tambak dan area perumahan di pesisir (Irawan et al., 2021). Adapun bentuk upaya adaptasi yang dilakukan oleh masyarakat dan pemerintah lokal dalam menghadapi ancaman penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) yang terjadi di Kota Semarang adalah dengan meninggikan bangunan rumah mereka yang tenggelam dan upaya pemerintah dengan meninggikan jalan, jembatan dan fasilitas lainnya yang terdampak (Andreas et al., 2017). Bentuk adaptasi tersebut dilakukan secara temporal dan tidak akan bertahan lama, sedangkan untuk upaya mitigasi seperti *monitoring* masih minim dilakukan (Andreas et al., 2017).

II.3.2. 3 Cekungan Bandung

Cekungan Bandung menjadi salah satu wilayah yang terindikasi mengalami fenomena penurunan permukaan tanah (Abidin et al., 2015). Dengan ketinggian wilayah sekitar 650 – 700 meter di atas permukaan laut, luas kawasan sekitar 2.300 Km², Cekungan Bandung berada pada 5 wilayah administratif, yaitu Kota Bandung, Kabupaten Bandung, Kabupaten Bandung Barat Kabupaten Sumedang, dan Kota Cimahi (Abidin et al., 2015). Cekungan Bandung, tercatat mengalami penurunan permukaan tanah sekitar 8 cm/tahun yang diperkirakan akan terus meningkat sampai 23 cm/tahunnya pada beberapa lokasi tertentu (Abidin et al., 2015).

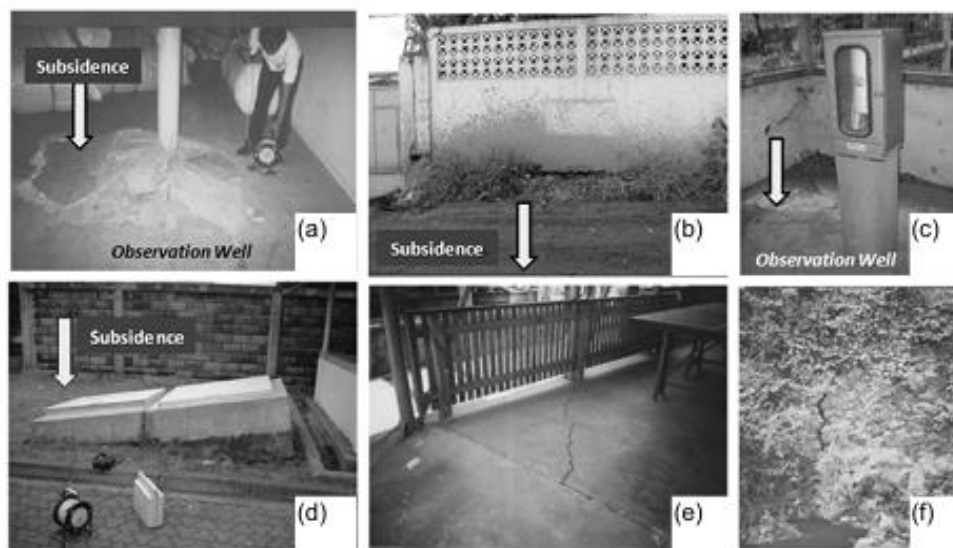
Dalam penelitian (Gumilar et al., 2012), yang telah memantau laju penurunan permukaan tanah pada Cekungan Bandung dari tahun 2000 hingga 2009, menunjukkan laju penurunan permukaan tanah yang pada awal tahun 2000-2001 signifikan terjadi di Kota Cimahi, Dayuh Kolot dan Rancaekek, sedangkan pantauan laju penurunan permukaan tanah pada tahun 2008- 2009 menunjukkan perubahan kawasan yang paling terdampak laju penurunan permukaan tanah adalah Kawasan sekitar Kecamatan Gedebage yang berada di Kota Bandung.

Dalam penelitian (Gumilar et al., 2012), tercatat laju penurunan tanah pada tahun 2009 yang terjadi di Kota Cimahi, Dayeuhkolot serta Kecamatan Gedebage dan sekitarnya (Gumilar et al., 2012). Terdapat beberapa penyebab dari ancaman

penurunan permukaan tanah yang terjadi di Cekungan Bandung, baik terjadi secara alami oleh konsolidasi tanah aluvium dan pergerakan tektonik, serta karena faktor antropologi seperti beban bangunan dan pengambilan air tanah secara berlebihan (Abidin et al., 2015). Berdasarkan hasil penelitian (Abidin et al., 2015) terhadap penurunan permukaan tanah di Cekungan Bandung, secara signifikan terjadi pada kawasan industri, yang menggunakan air tanah dengan jumlah besar.

Pengambilan air tanah telah berlangsung sejak lama di Kawasan Cekungan Bandung, dari tahun 1900 hingga 1995 tercatat pengambilan air tanah terus meningkat pada kawasan Bandung Raya, yang menyebabkan percepatan penurunan permukaan tanah (Abidin et al., 2006). Sejak tahun 1980-an tercatat penurunan muka air tanah akibat ekstraksi pada lapisan akuifer di Cekungan Bandung mencapai 1 hingga 2,5 meter (Abidin et al., 2006). Lapisan akuifer di Cekungan Bandung terdiri atas akuifer dangkal dan dalam, akuifer dangkal berada pada kedalaman hingga 40 meter di bawah permukaan, sedangkan akuifer dalam berada pada kedalaman lebih dari 40 hingga 250 meter di bawah permukaan tanah yang proses pengambilan air tanah ini menyebabkan kompaksi yang memicu penurunan permukaan tanah (Abidin et al., 2006).

Dampak dari adanya *land subsidence* pada Cekungan Bandung dapat dilihat dalam berbagai bentuk kerusakan seperti retakan pada berbagai konstruksi bangunan, perubahan arah aliran drainase, retakan pada jaringan jalan, tidak berfungsinya jaringan drainase, serta menyebabkan perluasan pada area banjir (Abidin et al., 2015). Cisaranten Kidul yang merupakan salah satu kelurahan di Kecamatan Gedebage, Kota Bandung, yang teridentifikasi di Cekungan Bandung mengalami dampak *indirect* dari *land subsidence* dengan dampak perluasan area banjir (Ge et al., 2014). Penyebab dari *land subsidence* di kawasan ini adalah pengambilan air tanah berlebih dan terjadi secara alami karena faktor litologi (Ge et al., 2014). (Gambar II.13), merupakan beberapa gambaran dampak penurunan permukaan tanah yang terjadi di Cekungan Bandung:



Gambar II. 13 Dampak *Land Subsidence* di Cekungan Bandung
(Gumilar et al., 2009)

Gambar II.13 di atas berdasarkan penelitian (Gumilar et al., 2009), menunjukkan (a) penurunan tanah di area Rancaekek, (b) dan (f) dinding yang tampak bersekat atau memiliki jarak dengan permukaan tanah serta retakan pada struktur di Kawasan Leuwigajah, Kota Cimahi, (c) tampak penurunan permukaan tanah di Ujung Berung, (d) penurunan tanah diferensial di Kecamatan Gedebage Kota Bandung, (e) serta retakan pada struktur stasiun Dayeuhkolot.

II.4 Penataan Ruang terhadap Ancaman *Land Subsidence*

Menurut Undang-Undang Republik Indonesia No 26 Tahun 2007 Tentang Penataan Ruang, penataan ruang adalah sebuah sistem yang mencakup proses perencanaan tata ruang, pemanfaatan ruang, serta pengendalian terhadap pemanfaatan ruang.

- Perencanaan tata ruang merupakan proses yang bertujuan untuk menentukan susunan struktur ruang dan pola ruang, termasuk penyusunan serta penetapan rencana tata ruang.
- Pemanfaatan ruang merupakan langkah untuk merealisasikan struktur dan pola ruang sesuai dengan rencana tata ruang, melalui penyusunan serta pelaksanaan program dan pembiayaannya.
- Pengendalian pemanfaatan ruang adalah upaya untuk memastikan terwujudnya keteraturan dalam tata ruang.

Dalam Undang-Undang Republik Indonesia No 26 Tahun 2007 Tentang Penataan Ruang, menjelaskan lebih lanjut, bahwa:

- Perencanaan tata ruang bertujuan untuk menyusun struktur dan pola ruang yang sesuai dengan kebutuhan, pemanfaatan ruang mengimplementasikan rencana tersebut melalui program-program yang terencana dan pembiayaan yang tepat, sementara pengendalian pemanfaatan ruang memastikan terciptanya keteraturan dan kesesuaian penggunaan ruang dengan rencana yang telah ditetapkan.
- Perencanaan, pemanfaatan dan pengendalian merupakan proses saling mendukung untuk mewujudkan tata ruang yang efisien, teratur, dan berkelanjutan.
- Untuk mewujudkan perencanaan tata ruang yang berkelanjutan pada suatu wilayah pola ruang dan struktur ruang menjadi indikator penting.
- Pola ruang merupakan pembagian peruntukan penggunaan lahan dalam suatu wilayah, baik untuk kawasan budidaya maupun untuk kawasan lindung.
- Sedangkan struktur ruang dalam perencanaan tata ruang menjadi bagian pendukung kegiatan ekonomi masyarakat yang berada dalam suatu wilayah secara hierarkis berhubungan secara fungsional dengan susunan pusat-pusat permukiman serta jaringan sarana dan prasarana pendukung dalam wilayah.
- Adapun hal yang perlu dipertimbangkan dalam rencana tata ruang baik pola ruang maupun struktur ruang adalah melihat aspek kebencanaan yang ada dalam suatu wilayah. Sebagaimana dalam Undang-Undang Republik Indonesia No. 26 Tahun 2007 Tentang Penataan Ruang, 2007, menjelaskan Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI) merupakan negara yang berada pada kawasan rawan bencana, sehingga diperlukan upaya untuk melakukan penataan ruang berbasis pengurangan risiko bencana untuk meningkatkan kenyamanan, keselamatan dan penghidupan masyarakat di dalamnya.

Di Indonesia jenis bencana *land subsidence* masih kurang dipertimbangkan dalam perencanaan tata ruang, karena masih sedikit wilayah yang menghadapi ancaman

tersebut. Umumnya jenis bencana yang dikaji dalam pengurangan risiko adalah gempa, tsunami, letusan gunung api, banjir, banjir bandang, tanah longsor, kebakaran lahan dan hutan, kekeringan, cuaca ekstrem, gelombang ekstrem dan abrasi, likuefaksi, dan Covid-19 (BNPB, 2023). Sehingga untuk upaya pengurangan risiko bencana tersebut telah banyak di implementasikan.

Sedangkan untuk penanganan bencana penurunan permukaan tanah masih belum terdapat regulasi pasti di Indonesia. Padahal penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) sangat berdampak pada wilayah dan pembangunan berkelanjutan (Saputra, 2019). Namun tindakan individu tidak mampu untuk menyelesaikan permasalahan bencana tersebut karena adanya keterbatasan, sehingga diperlukan aktor pemerintah dalam perencanaan tata ruang dalam menghadapi ancaman bahaya (Saputra, 2019). Dalam penelitian Liu et al., (2023), adaptasi dan mitigasi dari fenomena *land subsidence* dapat dilakukan berdasarkan faktor pemicunya, seperti:

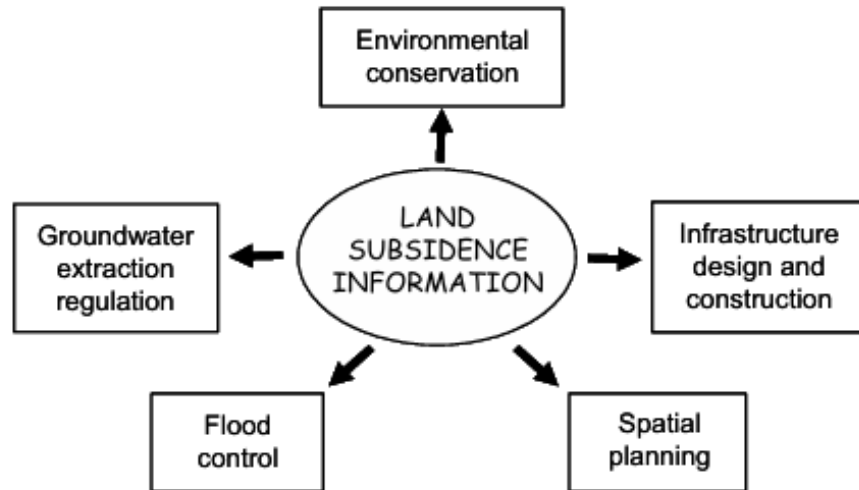
- Menghindari kegiatan konstruksi rekayasa skala besar pada tanah yang lunak. Hal yang dapat dilakukan dalam hal ini adalah pemulihan lahan basah yang dapat membantu mencegah penurunan muka tanah. Lahan basah yang seimbang ini berperan dalam penyaring udara dan menyeimbangkan serapan air hujan, sehingga tidak menghalangi air menuju lapisan akuifer. Hal ini juga membantu dalam meningkatkan kesuburan tanah dan mengurangi erosi.
- Dalam proses pembangunan skala besar, sebisa mungkin dilakukan pra-tekanan pada fondasi tanah sebelum konstruksi. Hal ini membantu untuk memadatkan permukaan tanah sebelum dilakukan pembangunan, sehingga mencegah terjadinya kerusakan bangunan atau sarana prasarana lainnya yang berada di atas permukaan.
- Perlu dilakukan pemantauan penurunan muka tanah secara berkala. Hal ini sangat penting dilakukan untuk meminimalisir terjadinya penurunan muka tanah yang berlangsung berkelanjutan. Selain dengan regulasi dari pemerintah, juga penting untuk menumbuhkan kesadaran dari masyarakat dalam mengontrol penurunan muka tanah.

- Mengurangi penggunaan air tanah dengan melakukan pembatasan dan kontrol. Dalam pengelolaan dan pencegahan penurunan tanah dalam berbagai penelitian menjelaskan beberapa cara yang dapat ditempuh untuk mengatasi dampak negatif dari adanya penurunan muka tanah tersebut, seperti pengelolaan penggunaan air tanah yang menjadi penyebab utama dari penurunan tanah, sehingga perlu dilakukan pengelolaan yang baik untuk penggunaan air tanah oleh pemerintah.

Sedangkan Abidin et al., (2015) dalam penelitiannya merinci contoh bentuk mitigasi dan adaptasi yang dapat dilakukan berdasarkan faktor penyebab *land subsidence* di perkotaan, seperti:

- Sebagai akibat dari penggunaan air tanah, dapat dilakukan upaya mitigasi dengan membatasi atau larangan pengambilan air tanah pada daerah yang rawan mengalami *land subsidence*, kemudian harus dilakukan regulasi dan penegakan sanksi terhadap perlanggar pengguna air tanah pada kawasan rawan *land subsidence*. Untuk upaya adaptasi yang disebabkan oleh faktor penggunaan air tanah, dapat dilakukan dengan menyediakan sumber daya air permukaan dan melakukan pemantauan berkelanjutan terhadap karakteristik *land subsidence*.
- Jika disebabkan oleh faktor beban bangunan dan infrastruktur, maka dapat dilakukan upaya mitigasi dengan melakukan perencanaan pembangunan perkotaan dengan mempertimbangkan *land subsidence*, serta memperhatikan pembangunan perkotaan di daerah rawan *land subsidence* sehingga dapat menghindarkan dari dampak kerusakan. Untuk upaya adaptasi, dapat dilakukan penerapan kode pada bangunan yang khusus berada pada zona rawan atau berisiko mengalami *land subsidence*, kemudian dapat dilakukan pemantauan terhadap karakteristik penurunan permukaan tanah (*land subsidence*).
- Untuk *land subsidence* yang disebabkan oleh faktor litologi karena tanah lunak, diperlukan upaya adaptasi secara adaptif pada pembangunan perkotaan terhadap ancaman penurunan tanah dan perencanaan tata ruang.

Dalam perencanaan tata ruang, terdapat beberapa keuntungan dari informasi penurunan permukaan tanah (*land subsidence*). Berikut gambaran yang diberikan dalam penelitian (Abidin et al., 2006):



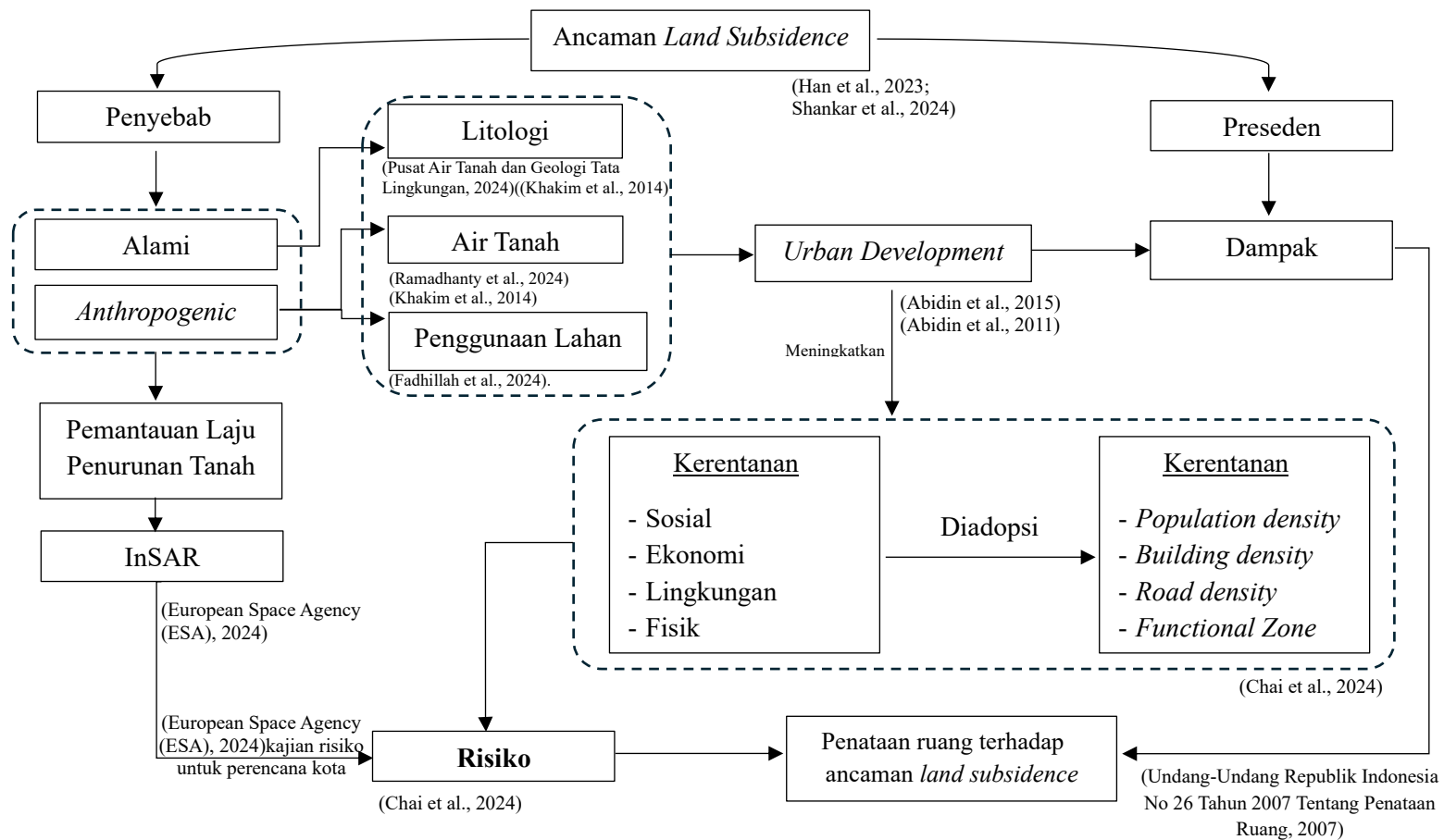
Gambar II. 14 Keuntungan dalam Memberikan Informasi *Land Subsidence*
(Abidin et al., 2006)

Menurut (Abidin et al., 2006), informasi terkait penurunan permukaan tanah (*land subsidence*) dapat menjadi acuan dalam regulasi pengambilan air tanah, pengendalian banjir, konservasi lingkungan, pengembangan infrastruktur yang tahan terhadap ancaman penurunan tanah, serta perencanaan dan pengembangan pembangunan dalam tata ruang secara spasial sehingga dapat tercipta perencanaan tata ruang yang berkelanjutan dan aman terhadap ancaman *land subsidence*.

II.5 Kerangka Teori

Kerangka teori dalam penelitian ini menghubungkan teori-teori yang membangun landasan dalam penelitian ini serta menggambarkan posisi tinjauan pustaka dalam membangun pemahaman teori lebih mendalam dari latar belakang, serta variabel yang digunakan dalam metode penelitian ini. Mulai dari penjelasan lebih lanjut terkait ancaman *land subsidence*, penyebab *land subsidence* (baik faktor alam maupun faktor manusia), dengan teknik pemantauan penurunan permukaan tanah menggunakan teknologi InSAR dapat diketahui penyebab penurunan permukaan tanah pada suatu wilayah, menurut European Space Agency (ESA)(2024) teknologi

InSAR sangat sesuai untuk digunakan oleh perencana kota dalam melakukan kajian risiko terhadap ancaman *land subsidence*. Selain itu, juga ditunjukkan berbagai preseden wilayah baik mancanegara maupun di Indonesia yang mengalami dampak ancaman *land subsidence*, sehingga dari penyebab dan dampak dapat berpengaruh terhadap *urban development*, yang dalam penelitian Abidin et al., (2011 dan 2015) dapat meningkatkan kerentanan sosial, ekonomi, lingkungan dan fisik, yang dari penelitian Chai et al., (2024) diadopsi kedalam kerentanan *population density*, *building density*, *road density*, dan *functional zone* untuk dilakukan kajian risiko dengan pendekatan penelitian Chai et al., (2024). Berdasarkan UU Republik Indonesia No. 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang, Indonesia merupakan negara yang berada pada kawasan rawan bencana, sehingga diperlukan upaya untuk melakukan penataan ruang berbasis pengurangan risiko bencana untuk meningkatkan kenyamanan, keselamatan dan penghidupan masyarakat di dalamnya. Untuk gambaran kerangka teori dalam penelitian ini dapat lihat dilihat pada Gambar II. 15.



Gambar II. 15 Kerangka Teori Penelitian
Hasil Olahan Peneliti, 2024