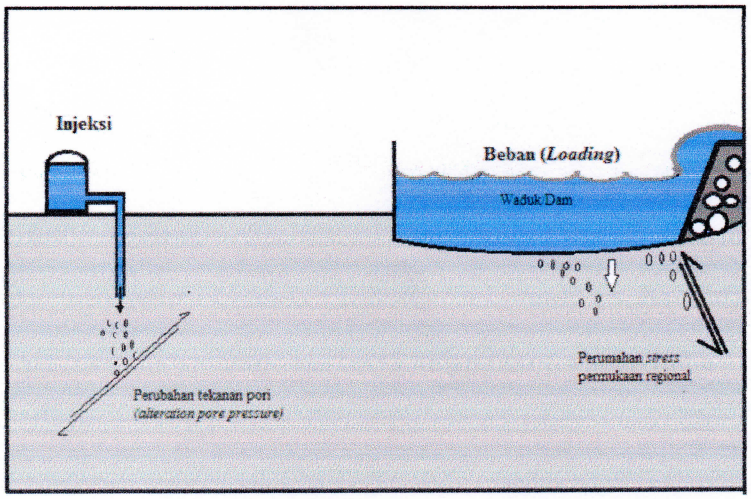
Potensi Gempabumi Induksi Pada Waduk

Supriyanto Rohadi, Urip Haryoko, Aprilia Nur Vita

Pembangunan waduk, bendungan, atau dam merupakan pembangunan infrastruktur penting sebagai pendukung pembangunan pada sektor lain, terutama sektor pertanian dan sektor energi. Pembangunan waduk menjadi keharusan, sejalan dengan usaha mencapai ketahanan pangan dan ketahanan energi. Keterlambatan dalam pembangunan waduk, berdampak terhadap pembangunan sektor lain.

Namun demikian, pembangunan waduk perlu memperhatikan keseimbangan lingkungan, dan potensi dampak yang ditimbulkan bagi lingkungan di sekitar lokasi pembangunan. Analisis dampak tentunya sudah dilakukan para ahli kontruksi, terutama pihak-pihak di lapangan sebelum dibangun waduk, dan juga selama operasional waduk. Dilihat dari segi kegempaan, pembangunan waduk berpotensi menimbulkan gempabumi induksi, dan juga sebaliknya, terjadinya gempabumi besar berjarak dekat dapat menimbulkan kerusakan kontruksi waduk.

Gempabumi induksi merupakan gempabumi yang disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti: eksplorasi tambang, injeksi sistem *geothermal*, pembangunan gedung (kontruksi), percobaan nuklir, dan pengisian air waduk (*impounding*).



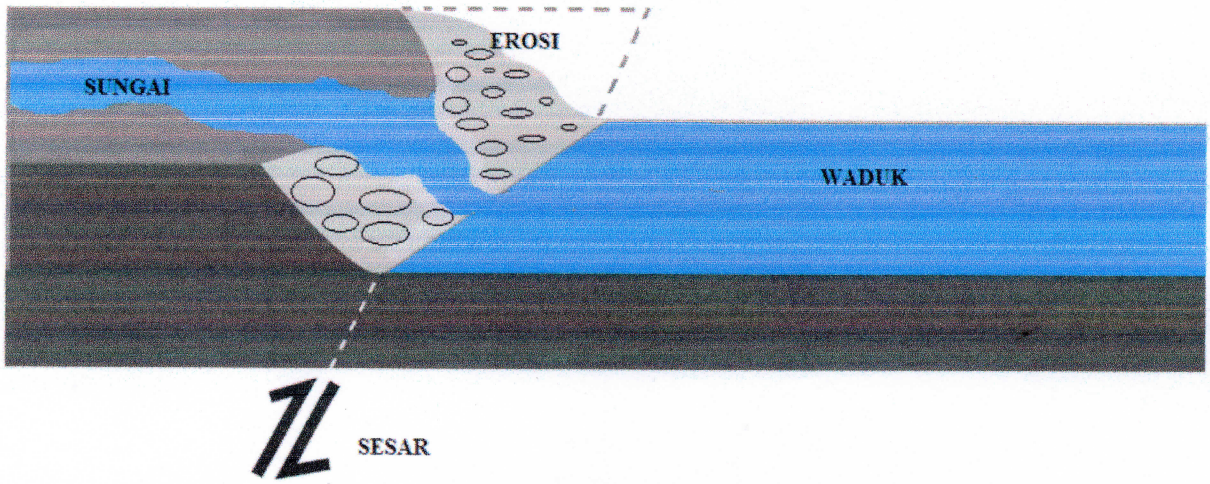
Gambar 1. Kartun proses gempabumi induksi yang dapat disebabkan oleh injeksi fluida dan juga peningkatan beban (*loading*) saat pengisian waduk. (modifikasi dari K. Cantner, 2013).

Pada kasus pengisian waduk, gempabumi induksi kadang disebut *Reservoir Triggered Seismicity* (RTS) atau *Reservoir Induced Seismicity* (RIS), yaitu gempabumi akibat proses fisis yang menyertai pengisian air pada waduk atau dam (Gambar 1). Namun pendapat lain mengatakan bahwa istilah induksi sebenarnya tidaklah tepat, karena gempabumi yang terjadi memang secara langsung disebabkan oleh pengisian waduk, bukan sebagai efek samping (induksi) dari pengisian waduk itu sendiri.

Kejadian ini tergantung pada besarnya tekanan air yang terbentuk pada *micro-crack* dan rongga pada pondasi dan di sekitar waduk. Air di dalam rongga atau pori batuan dibawah pengaruh tekanan hidrostatik menjadi semacam pelumas, bagi batuan yang mengalami regangan, namun karena terkendala gaya gesek pada bidang batuan sehingga belum mengalami pergerakan atau belum patah. Selain itu, RTS juga tergantung kondisi geologi dan litologi batuan sekitarnya. Oleh karena itu, sulit untuk memperkirakan kapan dan dimana RTS mungkin terjadi. Kasus RTS pertama kali teramati pada tahun 1930-an di danau Mead, bagian barat daya Amerika Serikat. Selain itu, RTS dengan magnitudo lebih besar lima, yang disebabkan oleh pengisian waduk teramati di beberapa tempat di dunia (Tabel 1). Gupta (2002) dalam penelitiannya menyatakan bahwa, lebih dari 90 kasus RTS yang diduga kuat dipicu oleh pengisian waduk. RTS yang besar dan merusak yang diindikasikan dipicu pengisian waduk, yakni gempabumi di Koyna, India, magnitudo 6,3, pada tahun 1967. RTS terbesar dan paling merusak adalah gempabumi Sichuan pada 12 Mei 2008 dengan magnitudo 7,9.

Tabel 1. Gempabumi induksi magnitudo > 4 yang terjadi di seluruh dunia (Gupta, 2002).

Nama Waduk (Dam)	Lokasi	Tahun	Magnitudo
Marathon	Greece	1938	M = 5.7
Hoover	USA	1939	M = 5.0
Lake Crowley	USA	1941	M = 6.0
Xinfengjiang	China	1962	M = 6.1
Kariba	Zambia	1963	M = 6.2
Kremasta	Greece	1966	M = 6.2
Benmore	N. Zealand	1966	M = 5.0
Koyna	India	1967	M = 6.3
Oroville	USA	1975	M = 5.7
Aswan	Egypt	1981	M = 5.3
Srinakharin	Thailand	1983	M = 5.9



Gambar 2. Tepi lembah yang telah mengalami erosi sepanjang sungai dimana semula merupakan bidang patahan merupakan lokasi ideal pembangunan waduk.

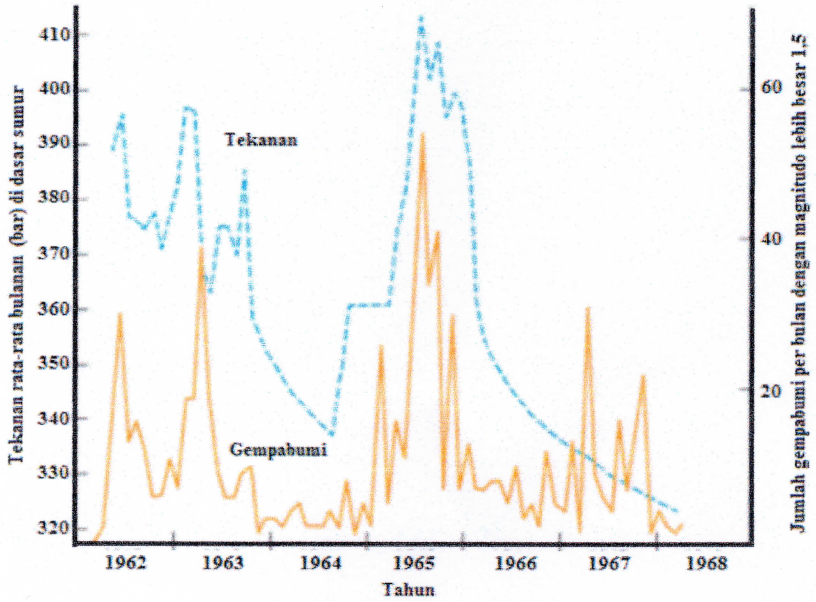
Waduk atau bendungan biasanya dibangun di daerah cekungan atau lembah, pada daerah seperti ini biasanya terjadi erosi aktif (Gambar 2). Adanya erosi aktif menyiratkan adanya pengangkatan (*up lift*) yang relatif baru, dibawah kontrol gaya tektonik kompresional, seperti: sesar naik (*thrust*) atau sesar turun (*reverse*). Oleh karena itu, dibawah waduk umumnya merupakan suatu sesar atau patahan, bisa berupa sesar naik atau turun yang masih aktif.

Mekanisme terjadi RTS, salah satunya adalah sebagai akibat adanya massa air waduk atau *reservoar* yang meningkatkan tekanan batuan di bawahnya. Perubahan tekanan yang besar dan dalam waktu yang relatif cepat menjadi pemicu gempabumi induksi. RTS yang terjadi akibat pengisian waduk biasanya relatif lebih besar, dibandingkan dengan gempabumi induksi akibat faktor lain, seperti injeksi fluida panas bumi (*geothermal*) atau eksplorasi bahan tambang. Selain itu, RTS umumnya dangkal dan episenter relatif dekat dengan waduk. Pada Gambar 3 ditunjukkan adanya peningkatan aktivitas gempabumi dan injeksi fluida atau intrusi fluida.

Menurut Jauhari (1999), penyebab mengapa waduk menyebabkan gempabumi adalah adanya tekanan air yang sangat besar pada *micro-cracks*, dan celah dibawah dan sekitar waduk. Besarnya massa air dan peningkatan tekanan pori di bawah waduk meningkatkan *stress* pada waduk tersebut. Kedalaman air pada saat pengisian waduk merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap terjadinya RTS. Dengan kata lain,

volume air waduk berpengaruh signifikan teradap kemungkinan potensi RTS. Selain itu, potesi gempa induksi bergantung juga pada struktur geologi batuan dasar, dan struktur patahan atau sesar di lokasi waduk (McGarr dkk., 2002).

Bendungan atau waduk besar dapat memicu gempabumi, hal ini disebabkan karena adanya perubahan stress yang diakibatkan berat air. Injeksi fluida atau intrusi fluida meningkatkan tekanan pori (*pore pressure*), mereduksi gaya gesek yang menjadi penghambat pergeseran sesar. Peningkatan tekanan pori (*pore pressure*) akan menurunkan kekuatan efektif batuan di bawah waduk tersebut. Namun untuk memungkinkan terjadi RTS diperlukan persyaratan lain, dimana sebelumnya suatu wilayah memang telah dipengaruhi *stress* tektonik lokal atau regional yang signifikan. RTS signifikan hanya mungkin terjadi di wilayah yang memiliki stress tektonik tinggi pada kerak bumi, seperti zona sesar. Pada zona sesar seperti ini, ditambah lagi peningkatan stress gravitasi *(loading)* dan penjalaran tekanan pori (*pore pressure*) pada saat dan sesudah pengisian waduk, dapat memicu lepasnya energi seismik berupa gempabumi.



Gambar 3. Injeksi fluida atau intrusi fluida meningkatkan tekanan pori (*pore pressure*), mereduksi gaya gesek yang menjadi penghambat pergeseran sesar (Cantner, 1996).

Pengaruh pengisian waduk terhadap kemungkinan RTS bisa berlangsung dalam waktu yang singkat selama waktu pengisian, dan juga dapat berlangsung dalam waktu yang lama, sejalan dengan operasional waduk tersebut. Setelah kontruksi waduk selesai dan selanjutnya pengisian air waduk, maka akan menimbulkan medan *stress* gravitasi. Medan *stress* ini menambah *stress* tektonik yang ada di wilayah tersebut. Selain itu, ketika tekanan air pada batuan mengalami kenaikan, pada saat yang sama tekanan dan air yang ada, masing-masing menjadi semacam pendorong dan pelicin bagi sesar yang sedang mengalami regangan tektonik, namun pergeseran tertahan karena adanya gesekan pada bidang sesar. Dengan kata lain, RTS ini terjadi ketika suatu aktivitas mengubah tegangan (*strain*) dan tekanan (*stress*) pada kerak bumi.

Antisipasi terhadap aktivitas RTS, biasanya dilakukan dengan pengamatan gempa-gempa kecil (mikro seismik). Pada umumnya gempa mikro (misalnya RTS) tidak terekam oleh jaringan seismograf Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), namun kemungkinan hanya terekam oleh seismograf di stasiun terdekat saja. Oleh karena itu, gempa mikro ini tidak dapat ditentukan lokasi sumbernya secara akurat menggunakan rekaman jaringan seismograf BMKG. Pengamatan biasanya dilakukan dengan memasang beberapa seismograf perioda pendek (*short period seismograph*) di sekitar waduk. Analisis gempa mikro dilakukan untuk mengetahui aktivitas dan distribusi gempa mikro. Data mikro seismik yang terekam saat pengisian waduk digunakan untuk mengetahui orientasi, tinggi, lebar, kompleksitas, dan dinamika patahan.

Fungsi utama pengamatan mikro seismik selama dan sesudah pengisian waduk, adalah untuk mengetahui pengaruh pengisian air terhadap penambahan tekanan pada dasar waduk atau formasi batuan. Penambahan tekanan ini berpotensi menyebabkan *hydraulic fracturing,* yang dapat menyebabkan RTS, selama dan sesudah pengisian waduk. Namun tidak hanya *hydraulic fracturing* yang perlu diwaspadai, tetapi juga aktivasi patahan lokal akibat *hydraulic fracturing* itu sendiri.

Pendapat mengenai potensi RTS memang mengalami penolakan dari sebagian komunitas teknik terkait, untuk bisa menjalankan tindakan antisipasi RTS yang direkomendasikan. Mekanisme bagaimana terjadinya RTS ini memang masih belum dapat diterima oleh sebagian kalangan. Namun jelas ada indikasi kuat bahwa keberadaan waduk pada suatu wilayah menunjukkan peningkatan frekuensi terjadinya

gempabumi di wilayah tersebut, dimana sebelumnya memiliki aktivitas kegempaan rendah. Oleh karena itu, di beberapa negara, kajian potensi RTS pada saat pengisian waduk harus dilakukan, terutama dengan kedalaman air lebih dari 100 meter.