

# Pemahaman Konseptual Dan Visual Tinggi Hidrolik Dan Aliran Air Tanah

Andrew J.B. Cohen dan John A. Cherry  
Penerjemah: Steven Reinaldo Rusli

*PEMAHAMAN KONSEPTUAL DAN  
VISUAL TINGGI HIDROLIK DAN  
ALIRAN AIR TANAH*

*The Groundwater Project*

***Andrew J.B. Cohen***

*Institut Teknologi New Jersey  
Newark, New Jersey, Amerika Serikat*

***John A. Cherry***

*G360 Institut Penelitian Air Tanah  
Guelph, Ontario, Canada*

*Penerjemah: Steven Reinaldo Rusli*

***PEMAHAMAN KONSEPTUAL DAN VISUAL  
TINGGI HIDROLIK DAN ALIRAN AIR TANAH***

*The Groundwater Project  
Guelph, Ontario, Kanada*

Semua hak terlindungi. Publikasi ini dilindungi oleh hak cipta. Tidak ada bagian dari buku ini yang boleh direproduksi dalam bentuk apapun atau dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis (untuk meminta izin hubungi: [permissions@gw-project.org](mailto:permissions@gw-project.org)). Distribusi dan reproduksi komersial sangat dilarang.

Karya-karya GW Project dapat diunduh secara gratis dari [gw-project.org](http://gw-project.org). Siapapun boleh menggunakan dan membagikan tautan [gw-project.org](http://gw-project.org) untuk mengunduh karya GW Project. Tidak diperbolehkan menyediakan dokumen Proyek GW di situs lain atau mengirimkan salinan dokumen tersebut secara langsung kepada orang lain.

Hak cipta © 2020 Andrew J.B. Cohen dan John A. Cherry (Penulis)

Diterbitkan oleh Groundwater Project, Guelph, Ontario, Kanada, 2020.

Cohen, Andrew J.B.

Conceptual and Visual Understanding of Hydraulic Head and Groundwater Flow/Andrew J.B. Cohen dan John A. Cherry - Guelph, Ontario, Kanada, 2020.

58 pages. ISBN: 978-1-7770541-6-8

Pemahaman Konseptual dan Visual Tinggi Hidrolik dan Aliran Air Tanah (terjemahan)/Andrew J.B. Cohen dan John A. Cherry - Guelph, Ontario, Kanada, 2020. Diterjemahkan oleh Steven Reinaldo Rusli, 2023, 59 halaman.

ISBN: 978-1-77470-085-3



*Editor Wilayah:* John Cherry dan Eileen Poeter

*Dewan:* John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira and Eileen Poeter

*Komite Pengarah:* John Cherry, Ying Fan, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Warren Wood, and Yan Zheng.

*Gambar Sampul:* Cohen and Cherry, 2020

*Penerjemah:* Steven Reinaldo Rusli



## Daftar Isi

<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>IV</b>
<b>DEDIKASI</b> .....	<b>VI</b>
<b>KATA PENGANTAR THE GROUNDWATER PROJECT</b> .....	<b>VII</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>VIII</b>
<b>PENDAHULUAN</b> .....	<b>IX</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	<b>X</b>
<b>1 MAKSUD DAN TUJUAN BUKU INI</b> .....	<b>1</b>
<b>2 PERTIMBANGAN DASAR</b> .....	<b>2</b>
2.1 HUKUM DARCY.....	2
2.2 KEMIRINGAN TINGGI HIDROLIK SEBAGAI MANIFESTASI VARIABEL DAN KONDISI LAINNYA.....	6
<i>Contoh Soal 1</i> .....	8
2.3 KOMPONEN TINGGI HIDROLIK .....	8
<i>Contoh Soal 2</i> .....	12
<b>3 PROFIL TINGGI DARCY</b> .....	<b>13</b>
<b>4 GARIS EKUIPOTENSIAL DAN ARAH ALIRAN</b> .....	<b>19</b>
4.1 PERTIMBANGAN UMUM.....	19
<i>Contoh Soal 3</i> .....	21
<b>5 ALIRAN LANGGENG JENUH DALAM SKALA LAPANGAN</b> .....	<b>23</b>
5.1 SIFAT HIDROLIK ALIRAN PADA AKUIFER TERTEKAN.....	24
<i>Contoh Soal 4</i> .....	25
5.2 SIFAT HIDROLIK ALIRAN PADA AKUIFER BEBAS.....	26
<i>Contoh Soal 5</i> .....	28
<i>Contoh Soal 6</i> .....	32
<i>Contoh Soal 7</i> .....	32
<i>Contoh Soal 8</i> .....	33
<i>Contoh Soal 9</i> .....	33
5.3 AKUIFER DAN AKUITAR.....	34
<i>Contoh Soal 10</i> .....	37
<i>Contoh Soal 11</i> .....	38
<i>Contoh Soal 12</i> .....	39
<b>6 RANGKUMAN</b> .....	<b>40</b>
<b>7 JAWABAN CONTOH SOAL</b> .....	<b>41</b>
<i>Jawaban Contoh Soal 1</i> .....	41
<i>Jawaban Contoh Soal 2</i> .....	42
<i>Jawaban Contoh Soal 3</i> .....	43
<i>Jawaban Contoh Soal 4</i> .....	44
<i>Jawaban Contoh Soal 5</i> .....	45
<i>Jawaban Contoh Soal 6</i> .....	46
<i>Jawaban Contoh Soal 7</i> .....	48
<i>Jawaban Contoh Soal 8</i> .....	49
<i>Jawaban Contoh Soal 9</i> .....	50
<i>Jawaban Contoh Soal 10</i> .....	51
<i>Jawaban Contoh Soal 11</i> .....	52
<i>Jawaban Contoh Soal 12</i> .....	54

<b>8</b>	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>TENTANG PENULIS .....</b>	<b>57</b>
<b>10</b>	<b>TENTANG PENERJEMAH .....</b>	<b>58</b>

## Dedikasi

Didedikasikan untuk penyebaran yang dermawan mengenai pengetahuan air tanah.

## Kata Pengantar The Groundwater Project

Anggota dan Mitra Perairan PBB (*The United Nations Water Members and Partners*) menetapkan tema tahunan mereka beberapa tahun lebih awal. Tema Hari Air Sedunia (*World Water Day*) pada 22 Maret 2022 adalah “Air Tanah: membuat yang tak terlihat menjadi terlihat.” (*Groundwater: making the invisible visible*). Tema ini sangat tepat untuk debut buku pertama Groundwater Project (GW-Project) di tahun 2020, yang bertujuan membuat air tanah lebih ‘terlihat’ oleh publik.

GW-Project, sebuah organisasi nirlaba yang terdaftar di Kanada pada tahun 2019, berkomitmen untuk berkontribusi pada kemajuan pendidikan dan membawa pendekatan baru dalam penciptaan dan penyebaran pengetahuan untuk memahami dan memecahkan masalah. GW-Project mengoperasikan situs <https://gw-project.org> sebagai platform global untuk demokratisasi pengetahuan air tanah dan didasarkan pada prinsip bahwa:

*“Pengetahuan semestinya tersedia secara cuma-cuma dan pengetahuan terbaik adalah pengetahuan yang cuma-cuma.” Anonim*

Misi GW-Project adalah untuk menyediakan materi edukatif yang mudah diakses, menarik, berkualitas tinggi, secara gratis dan daring dalam banyak bahasa, kepada semua orang yang ingin belajar tentang air tanah dan memahami bagaimana air tanah berhubungan dengan, dan menopang, sistem ekologi dan kemanusiaan. Ini adalah jenis baru dari upaya pendidikan global yang didasarkan pada kesukarelaan para profesional dari berbagai disiplin ilmu dan termasuk di dalamnya, akademisi, konsultan, dan pensiunan. GW-Project melibatkan ratusan sukarelawan yang terasosiasi dalam lebih dari 200 organisasi dari lebih dari 14 negara dan enam benua, dengan partisipasi yang masih terus meningkat.

GW-Project adalah upaya yang sedang dan akan terus berlanjut dengan ratusan buku yang diterbitkan secara daring dalam beberapa tahun mendatang, pertama dalam bahasa Inggris dan kemudian dalam bahasa lain, untuk diunduh di mana pun Internet tersedia. Publikasi GW-Project juga menyertakan materi pendukung seperti video, kuliah, demonstrasi laboratorium, dan alat pembelajaran selain menyediakan, atau menghubungkan ke, perangkat lunak domain publik untuk berbagai aplikasi air tanah yang mendukung proses pendidikan.

GW-Project adalah entitas hidup, sehingga edisi buku terbaru selalu akan diterbitkan dari waktu ke waktu. Pengguna diajak untuk mengusulkan revisi.

Kami berterima kasih atas kesediaan Anda menjadi bagian dari Komunitas GW-Project. Kami berharap dapat mendengar pengalaman Anda dalam menggunakan buku dan materi terkait. Kami menyambut baik ide-ide dan para sukarelawan!

Panitia GW-Project

Oktober 2020

## Kata pengantar

Ilmu air tanah merupakan ilmu yang kompleks. Banyak jenis informasi yang dibutuhkan untuk mendapatkan pemahaman yang komprehensif mengenai air tanah. Namun, informasi yang paling mendasar dan penting adalah mengenai tinggi hidrolik. Tinggi hidrolik adalah elevasi air dalam sumur relatif terhadap permukaan horizontal tertentu (datum), seperti permukaan laut. Ketika tinggi hidrolik dikombinasikan dengan sifat dasar batuan seperti konduktivitas hidrolik di dalam konteks hukum Darcy, banyak hal dapat diturunkan tentang arah aliran air tanah. Ini merupakan titik awal untuk menyelidiki berbagai jenis situasi air tanah. Untuk mengukur tinggi hidrolik, kita mengebor atau menggali lubang sampai menemukan permukaan air tanah. Atau, untuk sistem air tanah yang dalam, mengebor lubang yang dalam, dan menutup lubang-lubang pada pipa, sehingga air tanah hanya dapat mengalir naik dari bagian bawah pipa yang terhubung langsung dengan sistem air tanah menuju ke elevasi yang stabil.

Buku ini bertujuan untuk pengembangan pemahaman konseptual tinggi hidrolik dan kemampuan intuitif terkait untuk memvisualisasikan aliran air tanah dalam ruang satu dan dua dimensi, berdasarkan data tinggi hidrolik dan informasi tentang kondisi dasar batuan seperti konduktivitas hidrolik. Dalam tujuan untuk memfasilitasi perkembangan intuisi mengenai air tanah, digunakan skema-skema sederhana yang divisualisasikan untuk mewakili permasalahan-permasalahan yang ada. Diharapkan setelah mempelajari deretan permasalahan tersebut, yang diselengi oleh soal-soal latihan dalam bentuk yang mirip, pembaca dapat menafsirkan data tinggi hidrolik dari sistem air tanah di lapangan. Salah satu target juga adalah agar pembaca dapat membuat sketsa diagram sebagai jawaban atas berbagai bentuk "teka-teki" yang berhubungan dengan tinggi hidrolik dan konduktivitas hidrolik. Buku ini menjadi lebih efektif bila digunakan bersamaan dengan buku *Groundwater-Project Sifat Hidrogeologi Material Bumi dan Prinsip-prinsip Dasar Aliran Air Tanah (Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow)* (Woessner and Poeter, 2020).

Penulis yang lebih senior adalah seorang konsultan hidrogeologi dengan pengalaman luas dan minat khusus dalam desain gambar-gambar untuk menampilkan informasi air tanah secara lebih efektif dalam berbagai dimensi, dan yang telah mengajar kursus hidrogeologi kontaminan di tingkat universitas.

John Cherry, Kepala The Groundwater Project  
Guelph, Ontario, Kanada, Oktober 2020

## Pendahuluan

Motivasi untuk mengembangkan buku ini bermula dari pengalaman penulis mengajar hidrogeologi. Secara khusus, para penulis menemukan bahwa prinsip paling mendasar dari ilmu air tanah adalah mengenai tinggi hidrolik dan hukum Darcy. Meskipun sederhana dalam bentuk matematis, para pelajar seringkali mengalami kesulitan untuk mengkonseptualisasikan dan memvisualisasikan kedua prinsip tersebut. Padahal, konseptualisasi dan visualisasi merupakan keterampilan penting yang diperlukan untuk menginterpretasikan data hidrogeologi. Menyadari efektivitas pembelajaran visual, para penulis menyajikan banyak sketsa yang menghubungkan tinggi hidrolik dan sifat batuan untuk berbagai skenario aliran melalui media berpori. Setelah mempelajari deretan gambar, diselingi latihan soal, pembaca dipersiapkan untuk menginterpretasikan data tinggi hidrolik yang dikumpulkan dari sistem air tanah di lapangan. Penyelesaian contoh soal dalam buku ini membutuhkan pemahaman dan integrasi konsep, bukan menyelesaikan persamaan.

## Ucapan Terima Kasih

Kami berterima kasih kepada individu-individu berikut atas ulasan mereka yang menyeluruh dan bermanfaat untuk buku ini:

- ❖ Peter Gray, Wakil Presiden dan Hidrogeologis Senior, MTE Consulting, Kanada;
- ❖ Jana Levison, Lektor Kepala, G360 Institut Penelitian Air Tanah, Sekolah Keinsinyuran, Universitas Guelph;
- ❖ Eelco Lucas, Direktur, Institut Studi Air Tanah, Universitas Free State, Afrika Selatan;
- ❖ Jessica Meyer, Lektor, Departemen Ilmu Bumi dan Lingkungan, Universitas Iowa;
- ❖ Guy Patrick, Direktur, Patrick Consulting Incorporated, British Columbia, Kanada;
- ❖ Elisha Persaud, kandidat PhD Teknik Sumber Daya Air, University of Guelph;
- ❖ Kamini Singha, Profesor, Departement Teknik Geologi, Sekolah Pertambangan Colorado;
- ❖ Hugh Whiteley, Guru Besar, Teknik, Universitas Guelph, Kanada; dan,
- ❖ William Woessner, Profesor Emeritus Hidrogeologi, Universitas Montana, Missoula, Montana, Amerika Serikat.

Kami berterima kasih atas pengawasan Amanda Sills atas buku ini dan kepada Elhana Dyck atas penyalinannya, keduanya dari Groundwater Project, Guelph, Ontario, Kanada. Kami menghargai penyalinan, penyuntingan tata letak, dan produksi buku ini oleh Eileen Poeter (seorang sukarelawan Groundwater Project dari Colorado School of Mines di Golden, Colorado, AS).

# 1 Maksud dan Tujuan Buku Ini

Buku ini memperkenalkan konsep paling dasar dan esensial dalam ilmu air tanah. Secara khusus, dasar-dasar dari hukum Darcy, tinggi hidrolik (*hydraulic head*), kemiringan hidrolik (*hydraulic gradient*), dan kontur potensiometrik (*potentiometric contours*) disajikan dengan detail matematis yang minimal, dan lebih banyak menggunakan pendekatan konseptual dan visual yang diharapkan mengubah intuisi menjadi pengetahuan. Buku ini cocok dengan karya Woessner dan Poeter (2020), yang menyajikan pengetahuan dasar melalui prinsip matematika. Buku ini memperkenalkan percobaan Darcy dan hukum Darcy, dalam konteks kemiringan tinggi hidrolik, untuk menentukan tinggi hidrolik sebagai parameter kunci bersama dengan konduktivitas hidrolik (*hydraulic conductivity*) dalam memahami konsep aliran. Secara konseptual, air sumur digambarkan sebagai piezometer yang digunakan untuk mengukur tinggi hidrolik. Penekanan dalam buku ini terdapat pada aliran langgeng (*steady flow*) dan jenuh (*saturated flow*), pertama-tama dalam satu dimensi dan kemudian dalam dua dimensi untuk menunjukkan bagaimana distribusi tinggi hidrolik dan kemiringannya di dalam zona jenuh di bawah permukaan tanah dipengaruhi oleh variabilitas konduktivitas hidrolik dan kondisi-kondisi batas (*boundary conditions*) pada domain aliran yang diamati. Penekanan difokuskan melalui ilustrasi bagaimana profil tinggi hidrolik (distribusi tinggi hidrolik vertikal) dan kontur potensiometrik digunakan untuk menyimpulkan arah aliran air tanah di akuifer di mana aliran umumnya horizontal, dan di akuitard di mana aliran umumnya vertikal. Buku ini tidak membahas jaring aliran (*flow nets*) secara formal, tetapi beberapa gambar menunjukkan jaring aliran di mana permukaan air, garis ekuipotensial (dalam tampilan peta dan penampang) dan garis aliran disajikan, karena hubungan ini sangat mendasar untuk ilmu air tanah. Buku [Groundwater Project book](#) oleh Poeter and Hsieh (2020) menjelaskan jaring aliran dan bagaimana membangunnya. Secara keseluruhan, buku ini akan membekali para pelajar dengan dasar pengetahuan yang diperlukan untuk memvisualisasikan pola aliran air tanah berdasarkan elevasi air yang diukur dalam sumur dan dengan mempertimbangkan sifat dasar batuan.

Karena pengukuran tinggi hidrolik dapat diperoleh di lapangan dengan relatif mudah dengan ketidakpastian yang minimal, memahami sifat spasial data tinggi hidrolik adalah kunci pengembangan pemikiran hidrogeologi. Buku ini berisi sekumpulan gambar skematis sederhana dengan narasi yang mengilustrasikan poin-poin tertentu. Selain itu, contoh soal banyak disajikan di dalam buku ini; masing-masing dalam bentuk gambar sketsa dengan pertanyaan yang diajukan tentang apa yang ditunjukkan oleh gambar tersebut dan/atau justru meminta pelajar menggambar sketsa. Jawaban atas pertanyaan diberikan di bagian akhir buku, disertai dengan penjelasan dan alasan di balik jawaban yang benar. Untuk pertanyaan pilihan ganda, alasan mengapa pilihan lain salah juga disajikan, untuk memberikan kesempatan untuk pemahaman yang lebih dalam. Contoh soal membutuhkan pemahaman dan integrasi konsep, bukan menyelesaikan persamaan.

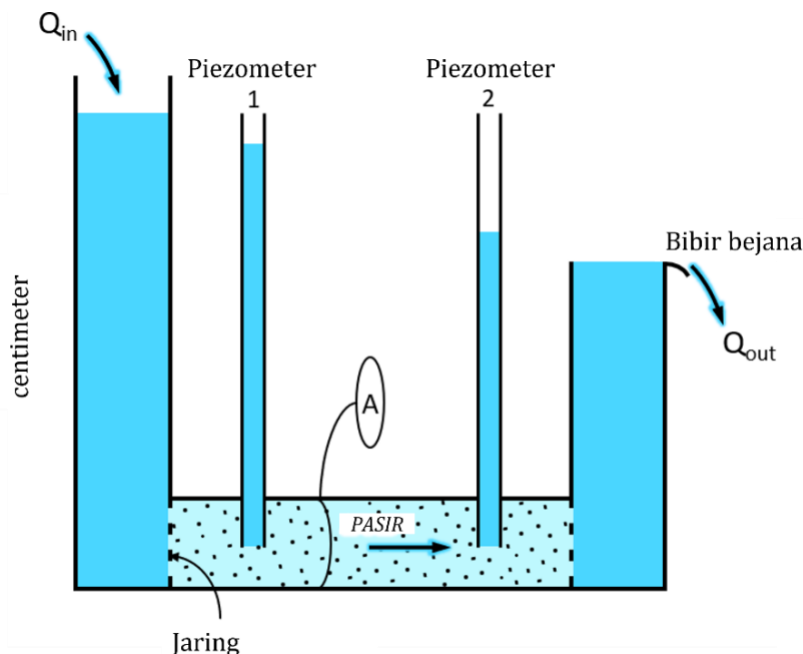


## 2 Pertimbangan Dasar

### 2.1 Hukum Darcy

Pada tahun 1856, Henry Darcy menerbitkan hasil eksperimen yang dilakukannya untuk lebih memahami prinsip aliran air melalui media berpori, yang digunakan dalam desain sistem pasokan air di Dijon, Prancis (Darcy, 1856). Berdasarkan hasil percobaan tersebut, Darcy menemukan hubungan matematis antara aliran fluida dengan kemiringan hidrolik. Hubungan matematis tersebut sekarang disebut hukum Darcy; yaitu persamaan dasar yang mendeskripsikan aliran fluida melalui media berpori, termasuk aliran air tanah. Darcy menemukan bahwa laju aliran air melalui silinder yang diisi penuh dengan pasir memiliki hubungan linier dengan kehilangan tinggi hidrolik sepanjang lapisan saringan (dalam hal ini, pasir di dalam silinder) dan bukan hanya terhadap perbedaan tekanan air. Selain relevansinya dengan hidrologi air tanah, hukum Darcy menjadi dasar kuantitatif dari banyak disiplin sains dan teknik termasuk ilmu pertanian, teknik sipil, teknik perminyakan, dan teknik kimia. Hukum Darcy sangat penting untuk memahami dan memprediksi perilaku aliran air tanah dan merupakan dasar untuk menginterpretasi berbagai pengukuran, seperti elevasi muka air di sumur.

Perhatikan peralatan eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar 1. Meski desain eksperimennya tidak persis dengan Darcy, pengaturan alat yang ditunjukkan memiliki gagasan yang sejalan, dalam artian hubungan antara perilaku hidrolika dan bentuk matematikanya sama dengan eksperimen Darcy.

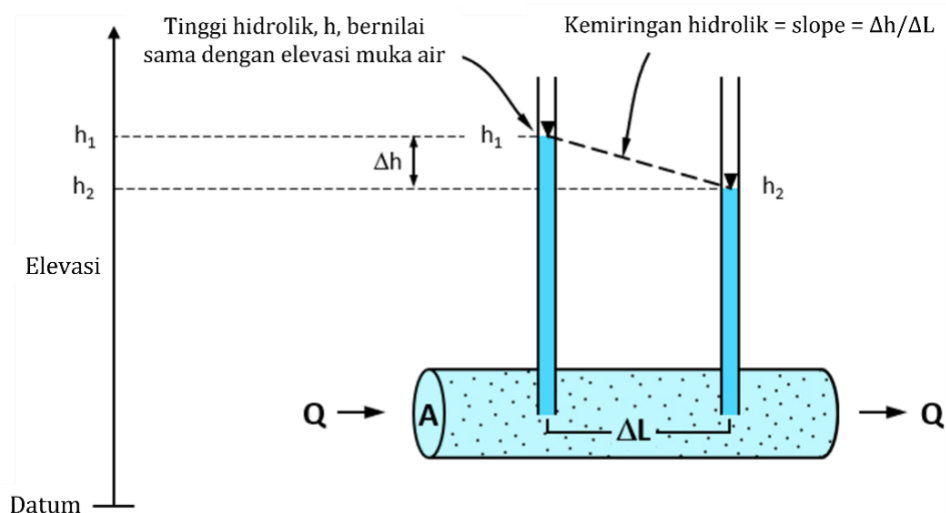


**Gambar 1** – Pengaturan peralatan percobaan untuk ilustrasi hukum Darcy.  $A$  adalah luas penampang silinder berisi pasir,  $Q_{in}$  adalah aliran ke dalam alat, dan  $Q_{out}$  adalah aliran keluar dari alat (Cohen dan Cherry, 2020).

Alat percobaan terdiri dari sebuah silinder dengan luas penampang  $A$  yang diisi dengan media berpori, contohnya pasir. Air dimasukkan secara perlahan ke dalam bejana kiri. Secara bertahap, air mengalir melalui silinder berisi pasir hingga pori pada lapisan pasir menjadi benar-benar jenuh. Elevasi muka air di setiap bejana terus naik hingga permukaan air di bejana kanan mencapai puncak dan mulai mengalir melewati bibir bejana. Dengan cara ini, meskipun air terus dimasukkan ke dalam bejana kiri, tinggi kolom air di sisi kanan tetap. Elevasi muka air di bejana kiri terus meningkat sampai laju aliran masuk,  $Q_{in}$ , sama dengan laju aliran keluar,  $Q_{out}$ , di mana pada saat tersebut elevasi muka air di kedua bejana menjadi stabil. Kondisi tersebut berarti *aliran langgeng* telah tercapai.  $Q$  adalah laju aliran volumetrik air melalui silinder (yaitu, volume per satuan waktu, dengan satuan seperti meter kubik per detik, galon per menit, liter per detik).

Piezometer (dalam hal ini, tabung terbuka berdiameter kecil) dimasukkan ke dalam silinder. Ujung atas setiap piezometer terbuka ke atmosfer, dan pada ujung bawah dipasangkan saringan sehingga air bisa masuk, tapi tidak dengan butiran pasir. Setelah dimasukkan, elevasi muka air di setiap piezometer naik ke elevasi yang stabil. Tinggi air yang diukur di setiap piezometer mewakili *tinggi hidrolik* di titik pengukuran, yang dalam hal ini adalah ujung terbuka piezometer di dalam lapisan pasir. Berikutnya, kita akan mengeksplorasi berbagai komponen dari tinggi hidrolik pada media berpori, terdiri dari tinggi tekan pada titik pengukuran akibat kolom air di atasnya, dan tinggi titik pengukuran. Seperti yang akan kita bahas lebih lanjut, *pengukuran tekanan saja tidak cukup untuk mengevaluasi kondisi air tanah*.

Gambar 2 adalah representasi singkat dari pengaturan percobaan yang menyediakan kerangka untuk menggambarkan hukum Darcy. Jika kita menetapkan datum arbitrer pada elevasi  $z = 0$  (misalnya, elevasi muka laut rata-rata), tinggi air di piezometer adalah  $h_1$  dan  $h_2$ . Jarak antara piezometer adalah  $\Delta L$ .



**Gambar 2** - Ilustrasi kemiringan hidrolik berdasarkan dua titik pengukuran. Kemiringan hidrolik ditentukan oleh jarak antara piezometer dan perbedaan tinggi hidrolik (Cohen dan Cherry, 2020).

Hukum Darcy (Persamaan 1) menyatakan bahwa laju aliran volumetrik,  $Q$ , berbanding lurus dengan: (1) perbedaan tinggi hidrolik sepanjang jarak antara dua titik tinjau,  $\Delta L$ ; (2) koefisien  $K$  (konduktivitas hidrolik), yang memperhitungkan hambatan aliran yang diakibatkan oleh media padat dan densitas serta viskositas fluida yang mengalir melalui media berpori (dalam hal ini, air melalui pasir); dan (3) luas penampang tegak lurus arah aliran:

$$Q = -K \frac{(h_2 - h_1)}{\Delta L} A \quad (1)$$

Tanda negatif menjelaskan bahwa aliran didefinisikan dengan tanda positif dalam arah penurunan tinggi hidrolik (air mengalir dari tinggi hidrolik yang lebih tinggi ke tinggi hidrolik yang lebih rendah). Sebagai contoh, pada Gambar 2, suku  $h_2 - h_1$  bernilai negatif, sehingga memasukkan nilai negatif tersebut ke dalam persamaan menghasilkan nilai positif untuk  $Q$ .

Sifat konduktivitas hidrolik dijelaskan secara lebih rinci dalam buku Groundwater Project oleh Woessner dan Poeter (2020). Istilah  $(h_2 - h_1)/\Delta L$  dapat dinyatakan secara lebih umum sebagai *kemiringan hidrolik* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$\Delta h / \Delta L \quad (2)$$

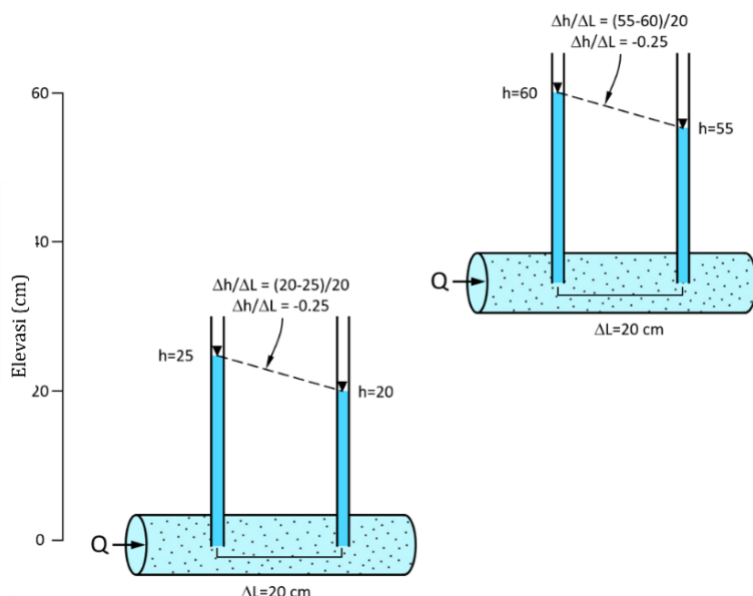
Kemiringan hidrolik sering dilambangkan dengan  $i$ , yang diwakili oleh kemiringan dari garis putus-putus pada Gambar 2. Oleh karena itu, hukum Darcy dapat dinyatakan dalam bentuk Persamaan 3.

$$Q = -KiA \quad (3)$$

Hukum Darcy berlaku untuk kondisi aliran laminar (non-turbulen), yang berarti laju aliran air cukup lambat sehingga lintasan partikel air tidak saling silang saat bermigrasi melalui rongga media berpori yang saling berhubungan. Yang dimaksud dengan “partikel air” di sini adalah kumpulan molekul air yang menempati volume yang cukup kecil sehingga dapat bermigrasi melalui jaringan ruang pori yang saling berhubungan tanpa pemisahan. Volume ini mungkin berada di tingkat mikrometer kubik atau lebih kecil. Hukum Darcy dibahas secara mendalam oleh Woessner dan Poeter (2020).

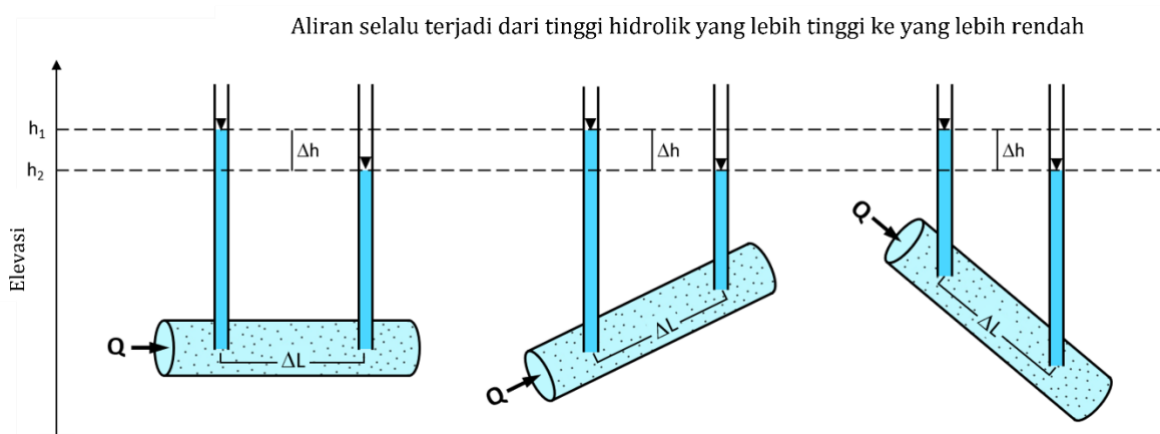
Setelah memahami hubungan dasar yang digambarkan sebagai hukum Darcy (Persamaan 3), perhatikan bahwa kemiringan hidrolik tidak bergantung pada tinggi absolut permukaan air. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, kemiringan hidrolik hanya bergantung pada selisih tinggi hidrolik relatif, dan bukan pada besaran masing-masing nilai tinggi hidrolik.

Kemiringan yang sama; posisi vertikal dari alat percobaan tidak berpengaruh



**Gambar 3** – Ilustrasi yang menunjukkan bahwa kemiringan hidrolik ( $\Delta h / \Delta L$ ) tidak bergantung pada elevasi absolut; tetapi hanya bergantung pada perbedaan tinggi hidrolik relatif (Cohen dan Cherry, 2020).

Selain itu, hukum Darcy juga tidak bergantung pada orientasi alat, karena aliran terjadi sesuai dengan arah kemiringan hidrolik. Misalnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, besarnya kemiringan hidrolik adalah sama di setiap kasus dan arah aliran selalu sejajar dengan orientasi alat.



**Gambar 4** - Orientasi alat berbeda dengan kemiringan hidrolik yang sama: besarnya gradien ( $\Delta h / \Delta L$ ) sama di setiap kasus dan arah kemiringan sejajar dengan tabung di setiap kasus. Hukum Darcy tidak bergantung pada orientasi alat, sehingga laju aliran,  $Q$ , sama di setiap kasus, dan arah alirannya sama, dalam hal ini sejajar dengan tabung (Cohen dan Cherry, 2020).

Gambar 4 juga mengilustrasikan aspek penting tentang bagaimana kita menginterpretasikan pengukuran kemiringan hidrolik, dan ini perlu diperhatikan sejak awal. Dalam kasus yang ditunjukkan di atas, kemiringan ditentukan dengan mengacu pada  $\Delta L$ , yang merupakan jarak antara titik pengukuran di sepanjang jalur aliran. Namun, dalam praktiknya, ketika kita mengukur elevasi muka air di sumur eksisting atau sumur

baru yang ditempatkan untuk mengukur kemiringan hidrolik, kita mungkin tidak mengetahui arah aliran (padahal, arah aliran adalah salah satu karakteristik paling mendasar dari air tanah yang ingin kita pastikan). Perhatikan berbagai kasus yang ditunjukkan pada Gambar 4; jika kita tidak dapat mengamati orientasi silinder, kesimpulan kita dari pengukuran tinggi hidrolik adalah bahwa ada beberapa *komponen* aliran dalam arah horizontal (ke arah kanan), dan jelas mungkin bahwa aliran juga dapat memiliki komponen ke atas atau ke bawah. Bahkan, kita dapat membayangkan kasus di mana kemiringan silinder bahkan lebih curam daripada kasus yang ditunjukkan, sehingga alirannya hampir vertikal. Contoh-contoh seperti ini menunjukkan pertimbangan dan pemikiran kritis yang diperlukan untuk menginterpretasikan data tinggi hidrolik dalam menyimpulkan arah aliran. Artinya, kita perlu memiliki beberapa pengetahuan atau asumsi mengenai faktor-faktor lain yang mempengaruhi aliran. Dalam hal ini, hal tersebut adalah orientasi kondisi batas (yaitu, sisi-sisi silinder); pengetahuan semacam itu menyediakan kerangka berpikir di mana kita dapat menginterpretasikan data tinggi hidrolik. Berikutnya dalam buku ini, kita membahas faktor-faktor lain mengenai interpretasi elevasi muka air di sumur, seperti variasi spasial konduktivitas hidrolik dan lokasi dan jenis zona resapan dan keluaran air tanah, karena hal ini harus dipertimbangkan untuk menginterpretasikan data tinggi hidrolik dengan tepat.

## 2.2 Kemiringan Tinggi Hidrolik sebagai Manifestasi Variabel dan Kondisi Lainnya

Kemiringan hidrolik ( $\Delta h/\Delta L$ ) seringkali diekspresikan secara matematis dalam bentuk turunan sebagai  $dh/dL$ . Penyusunan hukum Darcy menggunakan formulasi ini menunjukkan bahwa kemiringan hidrolik adalah fungsi dari  $Q$ ,  $K$ , and  $A$ :

$$-\frac{dh}{dL} = \frac{Q}{KA} \quad (4)$$

Oleh karena itu, perubahan pada salah satu dari variabel ini akan teraktualisasi sebagai perubahan kemiringan hidrolik

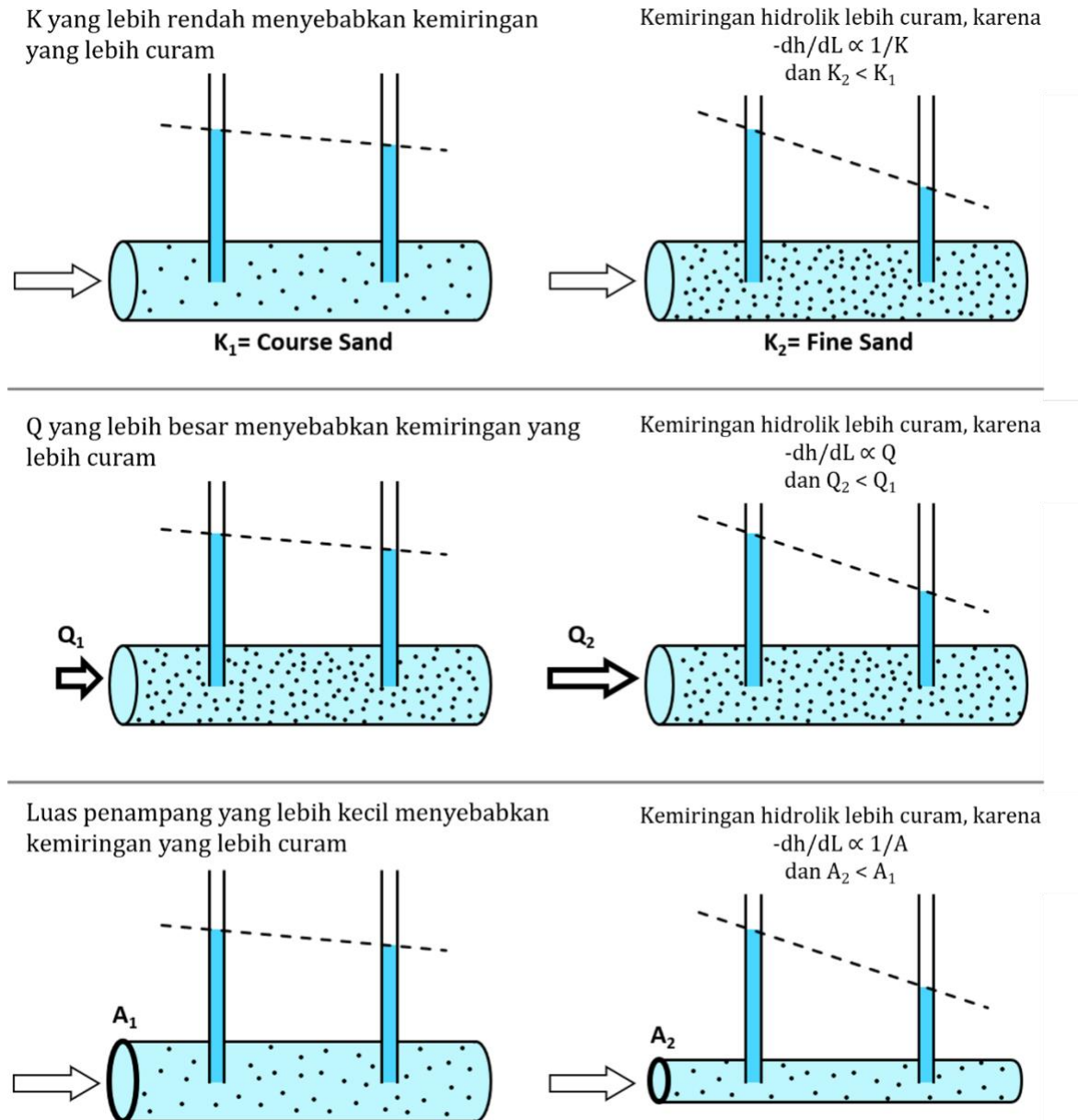
$$-dh/dL \propto Q \quad (5)$$

$$-dh/dL \propto 1/K \quad (6)$$

$$-dh/dL \propto 1/A \quad (7)$$

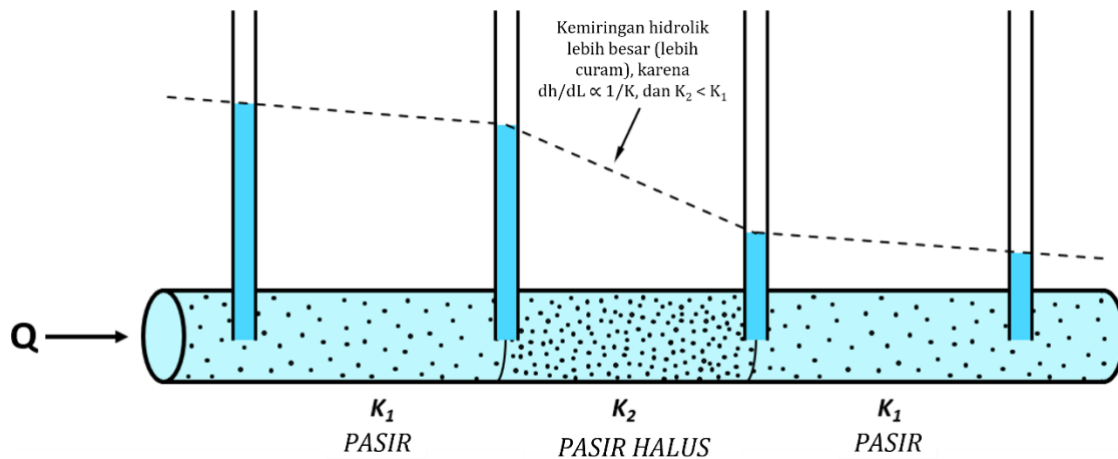
Tanda negatif disebabkan oleh fakta bahwa air mengalir dengan arah dari tinggi hidrolik yang lebih tinggi ke tinggi hidrolik yang lebih rendah, seperti yang dijelaskan sebelumnya. Istilah  $-dh/dL$  mewakili kemiringan penurunan tinggi hidrolik sesuai arah aliran ("kecuraman" dari kemiringan hidrolik).

Gambar 5 merangkum konsep ini menggunakan tiga skenario berbeda namun seragam secara spasial. Kemiringan hidrolik, yang biasanya diukur dengan elevasi muka air di sumur, bukanlah parameter pengendali yang menentukan aliran. Sebaliknya, kemiringan hidrolik merupakan manifestasi efek gabungan dari sistem geometri, sifat hidrogeologi dan laju aliran yang dikenakan pada sistem.



**Gambar 5** – Ilustrasi ketergantungan kemiringan hidrolik pada konduktivitas hidrolik, laju aliran, dan luas penampang aliran. Dalam setiap kasus, kemiringan berubah sesuai dengan hubungan proporsionalitas yang ditentukan oleh hukum Darcy (Cohen dan Cherry, 2020).

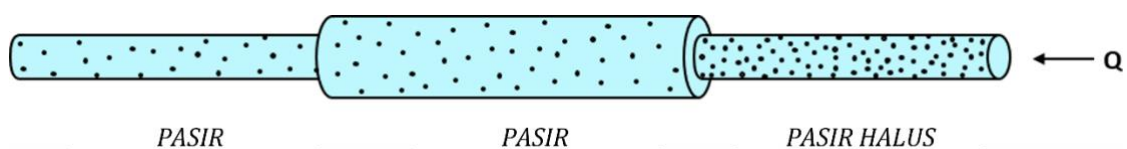
Pada contoh yang ditunjukkan pada Gambar 6,  $K_2 < K_1$  sedangkan  $Q$  dan  $A$  bernilai konstan.  $Q$  sama di setiap lokasi sepanjang tabung sesuai dengan prinsip kekekalan massa. Oleh karena itu, seperti yang ditunjukkan oleh hukum Darcy, kemiringan di wilayah  $K_2$  harus lebih curam daripada di wilayah lain. Skenario sederhana ini adalah contoh dari heterogenitas; dalam hal ini, konduktivitas hidrolik yang tidak seragam.



**Gambar 6** - Perubahan kemiringan hidrolik karena konduktivitas hidrolik yang tidak tetap. Dalam hal ini, kemiringan lebih curam di bagian dengan  $K$  lebih rendah, karena kemiringan hidrolik berbanding terbalik dengan  $K$  (Cohen dan Cherry, 2020).

### Contoh Soal 1

Buat sketsa kemiringan tinggi hidrolik arah horizontal sepanjang alat yang ditunjukkan di bawah ini dengan cara yang sesuai dengan cara kemiringan ditunjukkan pada Gambar 6 (tidak perlu mengetahui nilai tinggi hidrolik aktual, sehingga Anda dapat membuat nilai relatif Anda sendiri).



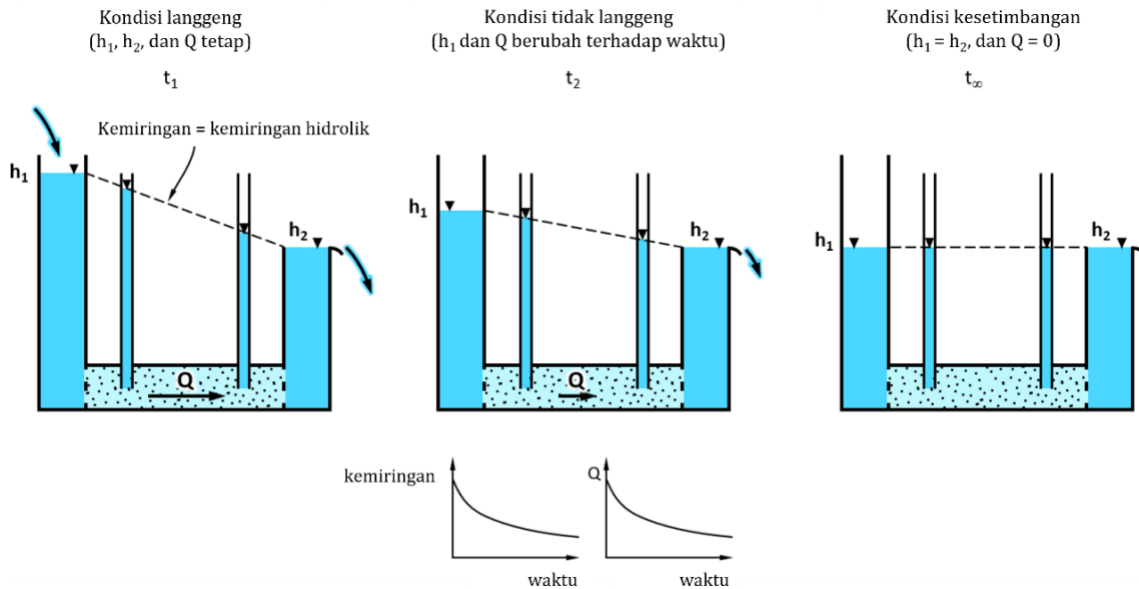
[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 1](#) ↴

## 2.3 Komponen Tinggi Hidrolik

Gambar 7 adalah modifikasi dari pengaturan percobaan yang dijelaskan sebelumnya dan diilustrasikan pada Gambar 1. Jika air tidak lagi dimasukkan ke bejana kiri, elevasi muka air di bejana kiri secara bertahap akan menurun, kemiringan hidrolik akan berkurang, dan aliran melalui silinder ( $Q_{out}$ ) juga akan menurun secara bertahap sesuai dengan hukum Darcy. Kondisi aliran yang tergantung waktu ini disebut sebagai *kondisi tidak langgeng (unsteady flow)*, yang relevan dengan pemodelan air tanah dan uji



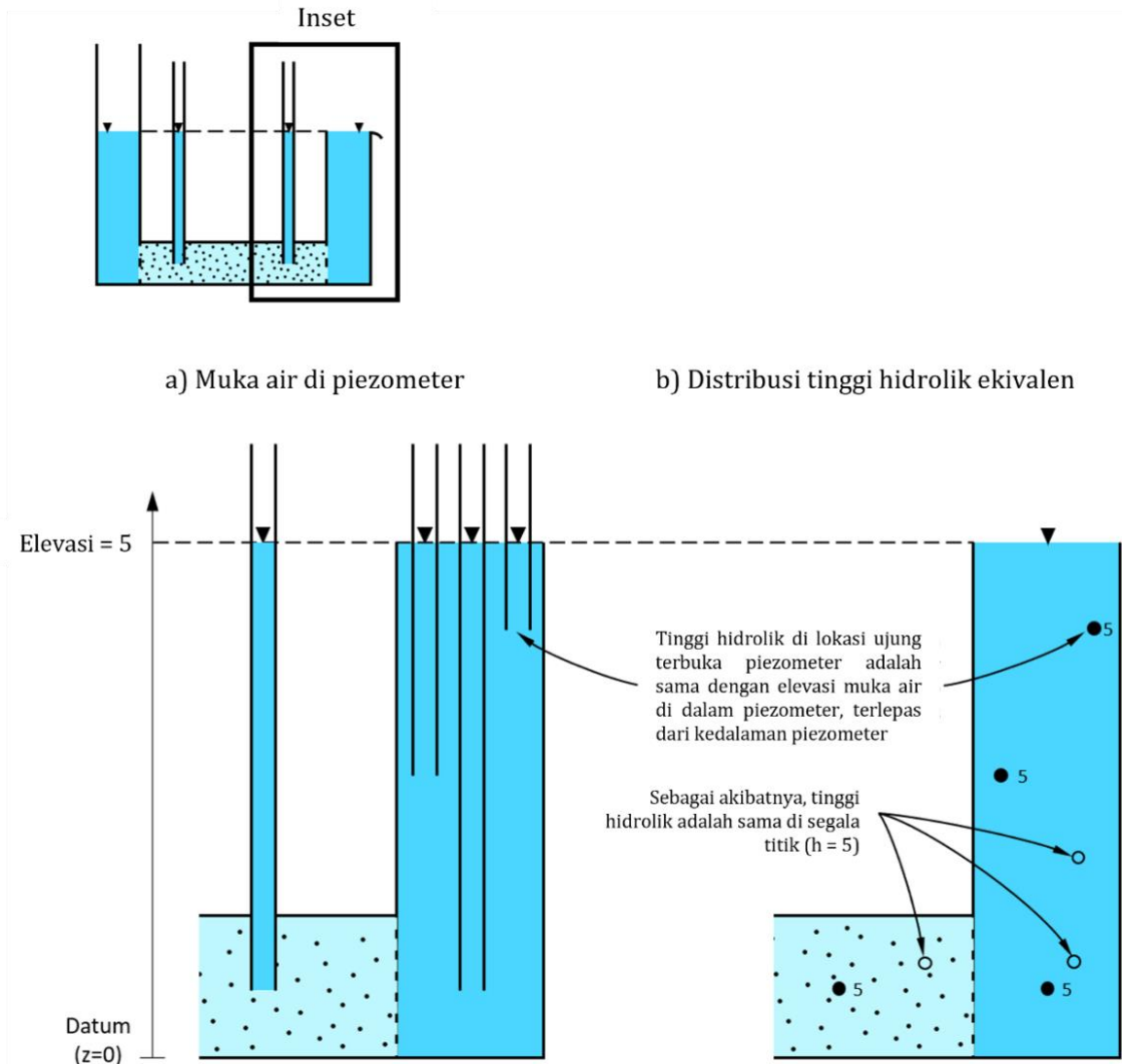
pemompaan, misalnya. Dalam skenario tidak langgeng yang digambarkan pada Gambar 7,  $h_1$  dan  $Q_{out}$  dapat dinyatakan sebagai fungsi waktu,  $f(t)$ , dan seringkali dinotasikan dengan  $h_1=f(t)$  dan  $Q_{out}=f(t)$ . Pada akhirnya, elevasi muka air di kedua sisi akan seimbang, kemiringan hidrolik akan sama dengan nol, dan dengan demikian air tidak lagi mengalir melalui silinder. Airnya statis di semua titik.



**Gambar 7** - Berbagai kondisi tinggi dan aliran hidrolik. Kondisi aliran langgeng ( $t_1$ ) dan kesetimbangan hidrolik ( $t_\infty$ ) masing-masing menentukan aliran konstan dan tidak ada aliran, sedangkan keadaan antara ( $t_2$ ) bersifat tidak langgeng dalam kondisi yang berubah dari waktu ke waktu (Cohen dan Cherry, 2020).

Mengacu pada kondisi kesetimbangan hidrolik ( $t_\infty$ ) pada Gambar 7, bayangkan jika sebuah piezometer dimasukkan ke dalam bejana pada berbagai kedalaman (Gambar 8). Air di semua piezometer akan naik ke elevasi yang sama, yaitu sama dengan elevasi muka air di bejana. Ini mungkin jelas dan mudah dimengerti secara intuitif, karena ini dapat dianalogikan dengan memasukkan sedotan ke dalam segelas air: tidak peduli seberapa dalam sedotan dimasukkan, elevasi air di dalam sedotan akan sama dengan elevasi air di dalam gelas. Perhatikan bahwa jika diameter sedotan cukup kecil, air dapat terangkat ke atas permukaan air di sekitarnya karena aksi kapiler; namun, dalam praktiknya diameter sumur (piezometer skala lapangan) tidak cukup kecil untuk menciptakan efek kapiler yang signifikan. Karena *titik pengukuran adalah ujung terbuka piezometer di dalam air*, latihan ini menunjukkan bahwa tinggi hidrolik sama di mana-mana dan tinggi hidrolik yang diukur pada ujung terbuka piezometer sama dengan elevasi naiknya air. Gambar 8 menunjukkan distribusi tinggi hidrolik yang dihasilkan; tinggi hidrolik adalah sama, yaitu 5 cm di semua titik, terlepas dari kedalaman pengukuran. Distribusi tinggi hidrolik dibahas secara lebih rinci di Bagian 3 dan 4 dalam konteks pengembangan peta kontur tinggi hidrolik dan penampang potensiometri, yang digunakan untuk menyimpulkan arah dan besaran aliran air tanah.





**Gambar 8** - Penggunaan piezometer untuk mengukur distribusi tinggi hidrolik; dalam hal ini, tinggi hidrolik sama di semua titik, terbukti dengan tinggi permukaan air yang sama di setiap piezometer (Cohen dan Cherry, 2020).

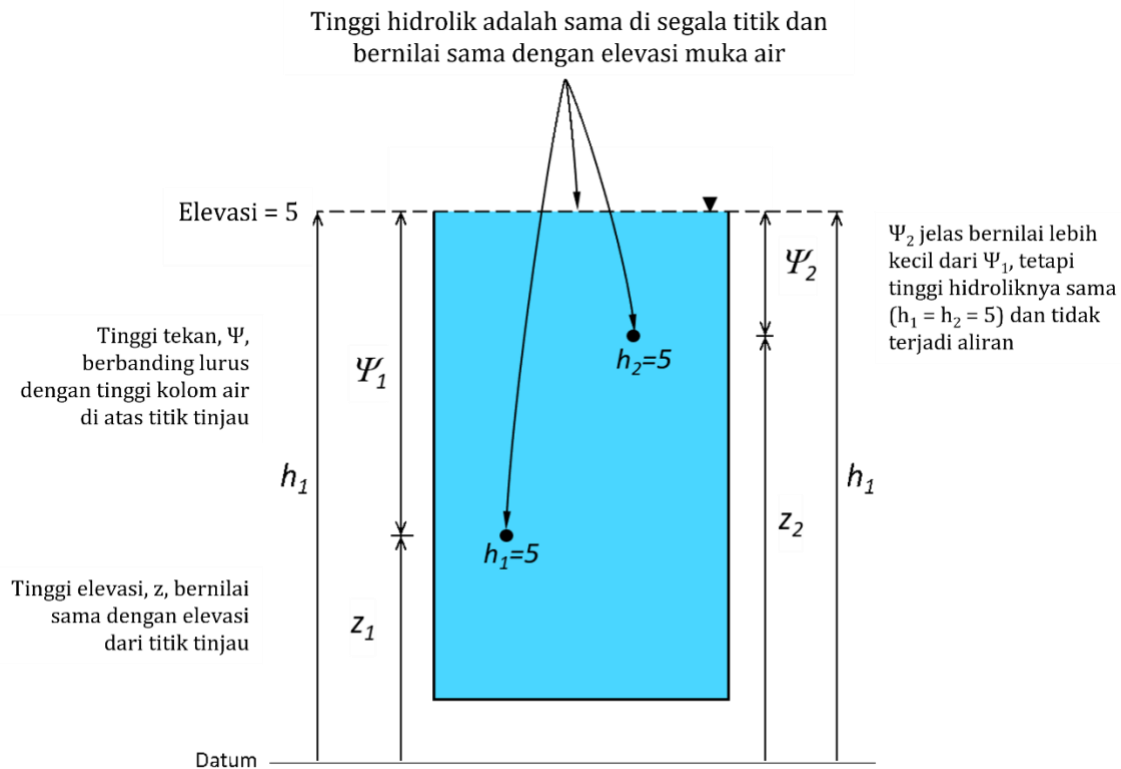
Gambar 9 menunjukkan komponen tinggi hidrolik dalam bejana air statis. Tinggi hidrolik ( $h$ ) pada setiap lokasi adalah penjumlahan dari tinggi elevasi titik pengukuran dan tinggi kolom air di atas titik tersebut. Karena komponen terakhir sebanding dengan tekanan pada kolom air, komponen tersebut sering disebut sebagai tinggi tekan ( $\Psi$ ), sedangkan elevasi titik pengukuran disebut sebagai tinggi elevasi ( $z$ ):

$$h_i = \Psi_i + z_i \quad (8)$$

Berkenaan dengan aliran di zona jenuh, tinggi permukaan air di piezometer adalah komponen yang menjadi perhatian kita, dan itulah yang harus dipahami oleh pembaca: *tinggi hidrolik dalam formasi jenuh sama dengan tinggi air yang naik dalam sumur, yang secara efektif merupakan piezometer.*

Tinggi hidrolik pada Gambar 9 adalah sama di semua titik. Dengan demikian, kemiringan hidrolik adalah nol di semua titik, sehingga elevasi muka air dalam piezometer

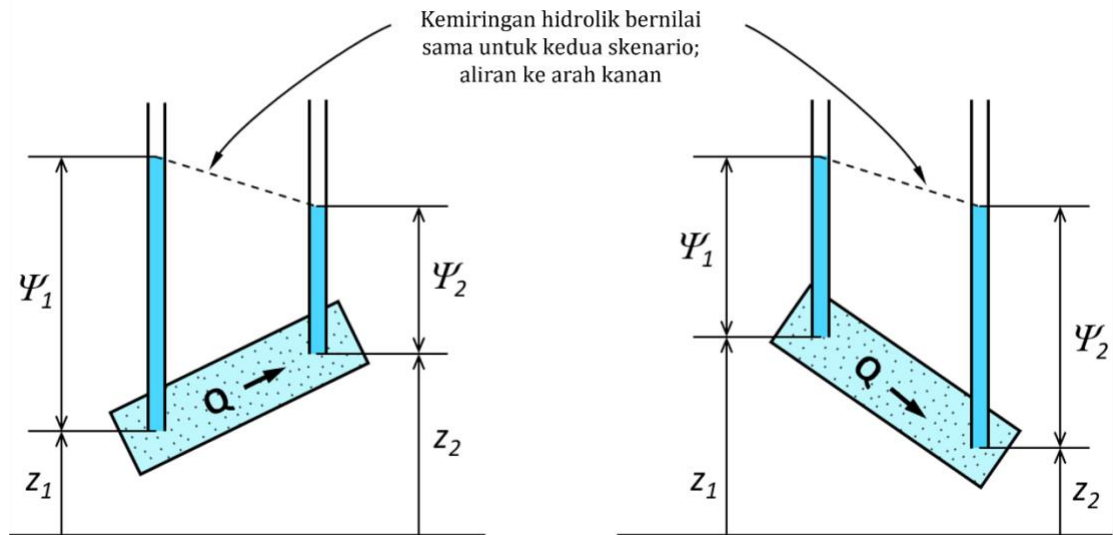
akan sama. Namun, tinggi tekan ( $\Psi$ ) pada piezometer berbeda (proporsional dengan tinggi kolom air di setiap piezometer). Pengaturan sederhana ini mengilustrasikan bahwa tinggi tekan tidak sebaiknya digunakan untuk menyimpulkan aliran.



**Gambar 9** - Tinggi hidrolik pada lokasi tertentu merupakan fungsi dari elevasi titik pengukuran ( $z$ ) dan tinggi air di atas titik pengukuran ( $\Psi$ ); Setiap titik berada pada elevasi yang berbeda, tetapi memiliki tinggi hidrolik yang sama karena komponen tinggi tekan dan tinggi elevasi berjumlah 5 pada kedua kasus ( $h_1 = h_2$ ), yang juga sama dengan elevasi muka air bebas (Cohen dan Cherry, 2020).

Prinsip yang sama berlaku untuk kondisi air mengalir. Sebagai contoh, Gambar 10 menunjukkan bahwa arah penurunan tinggi tekan ( $\Psi$ ) pada setiap konfigurasi berlawanan satu sama lain, namun arah aliran dan kemiringan hidrolik tetap sama untuk setiap skenario. Oleh karena itu, Gambar 10 menunjukkan dengan cukup jelas bahwa arah aliran tidak dapat didasarkan pada tinggi tekan saja, tetapi memerlukan evaluasi tinggi hidrolik, yang ditentukan oleh elevasi air di piezometer.

Arah aliran bergantung hanya pada kemiringan hidrolik, tidak pada kemiringan tinggi tekan

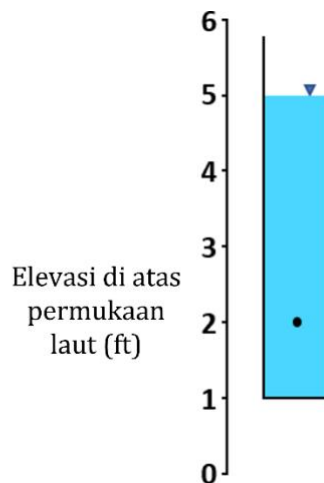


**Gambar 10** - Peralatan yang menunjukkan bahwa mengubah kemiringan silinder yang diisi pasir mengubah komponen tinggi elevasi dan tinggi tekan, tetapi tinggi hidrolik, kemiringan hidrolik, dan arah serta laju aliran tetap sama (Cohen dan Cherry, 2020).

**Contoh Soal 2**

Berapa tinggi hidrolik pada titik di kolom yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini?

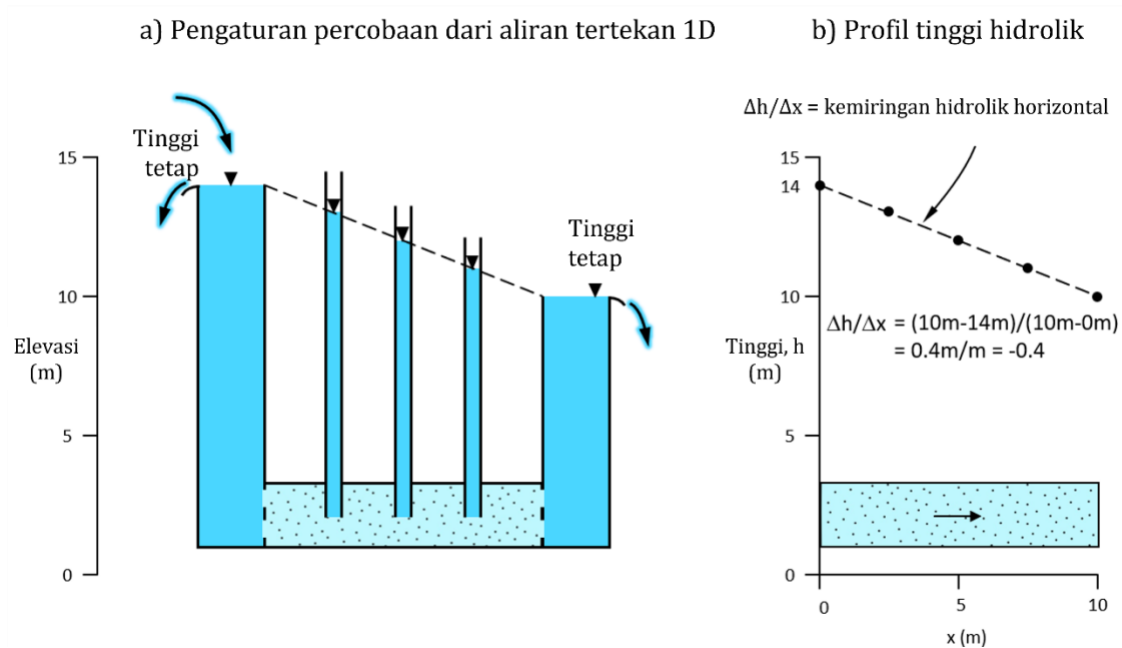
- a. 1 ft
- b. 2 ft
- c. 3 ft
- d. 4 ft
- e. 5 ft



[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 2](#)

### 3 Profil Tinggi Darcy

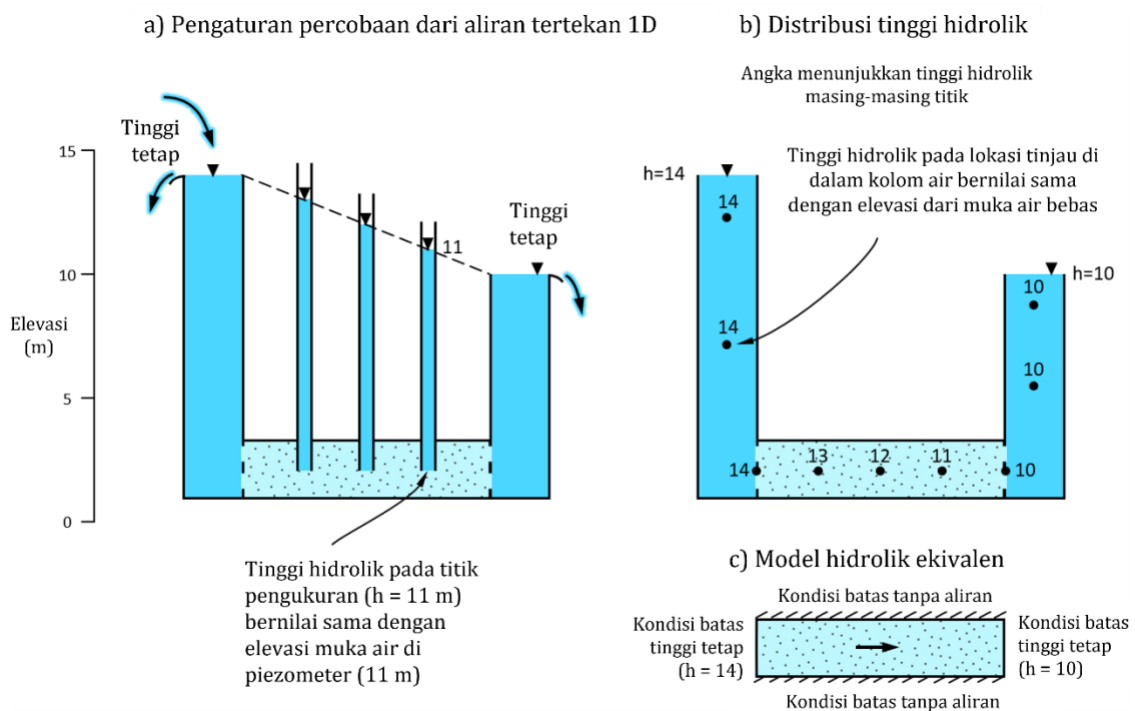
Mari kita kembali mempertimbangkan skenario kondisi aliran langgeng yang ditunjukkan pada Gambar 11a. Dalam kasus ini, elevasi muka air di kedua bejana dikondisikan tetap sama terhadap waktu, sehingga kedua sisi silinder media berpori dibatasi oleh tinggi hidrolik yang konstan, dan perbedaan tinggi hidrolik menyebabkan terjadinya aliran (yaitu, air mengalir dari daerah dengan energi potensial yang lebih tinggi ke daerah dengan energi potensial yang lebih rendah). Sesuai dengan hukum Darcy, terdapat kemiringan hidrolik dalam media berpori, dan air mengalir dari kiri ke kanan, seperti yang dinyatakan oleh kemiringan hidrolik, yang sama dengan  $-0,4$  m/m, seperti yang ditunjukkan pada profil tinggi hidrolik ( Gambar 11b).



**Gambar 11** - Demonstrasi aliran kondisi langgeng dan kemiringan hidrolik terkait dalam arah horizontal; air mengalir dari kiri ke kanan sesuai dengan arah penurunan energi potensial, seperti yang dinyatakan oleh profil tinggi hidrolik: a) pengaturan percobaan dan b) profil tinggi hidrolik (Cohen dan Cherry, 2020).

Perhatikan bahwa tinggi hidrolik dalam setiap kolom air bernilai sama dengan kedalaman air seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan seperti yang dijelaskan sebelumnya. Tinggi hidrolik pada setiap titik pengukuran di piezometer sama dengan elevasi bagian atas kolom air di piezometer. Secara teori, ada kemiringan tinggi hidrolik vertikal yang dapat diabaikan (dan mungkin tak terukur) di setiap bejana, karena ada juga aliran vertikal di dalam bejana, tetapi perbedaan tinggi di seluruh bejana tidak signifikan mengingat laju aliran yang lambat dan gesekan minimal yang ditimbulkan oleh sisi-sisi bejana. Jadi, untuk mempermudah, profil tinggi hidrolik dapat dianggap seragam di setiap kolom air.

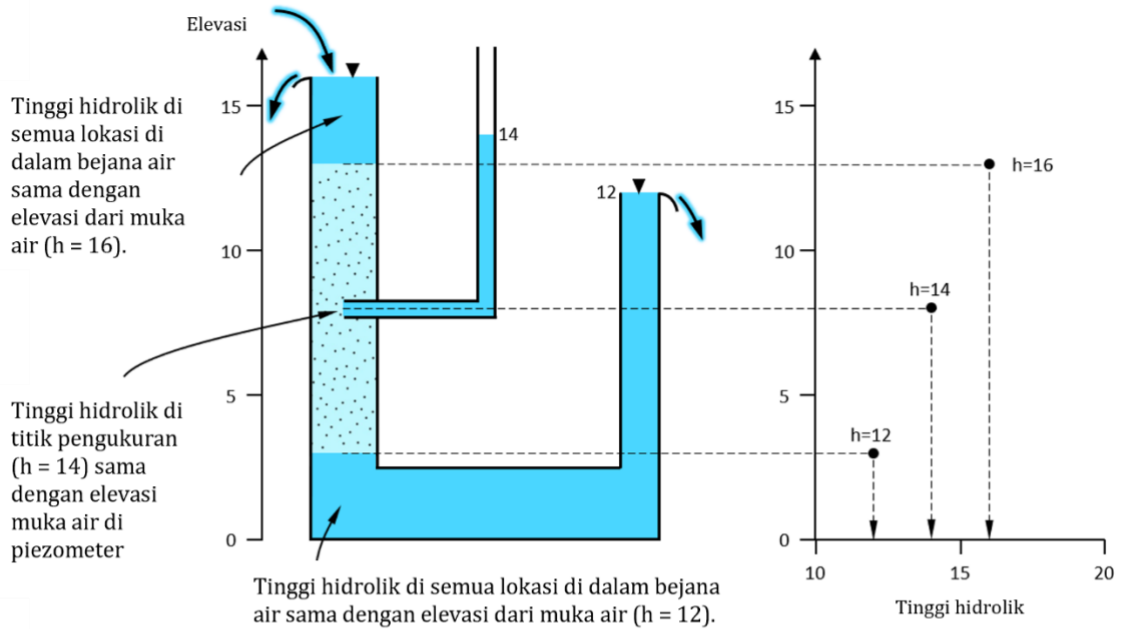
Pengaturan percobaan ini menyediakan kesempatan untuk memperkenalkan beberapa konsep pemodelan hidrolik sederhana, yang digambarkan sebagai model hidrolik ekuivalen (Gambar 12c).



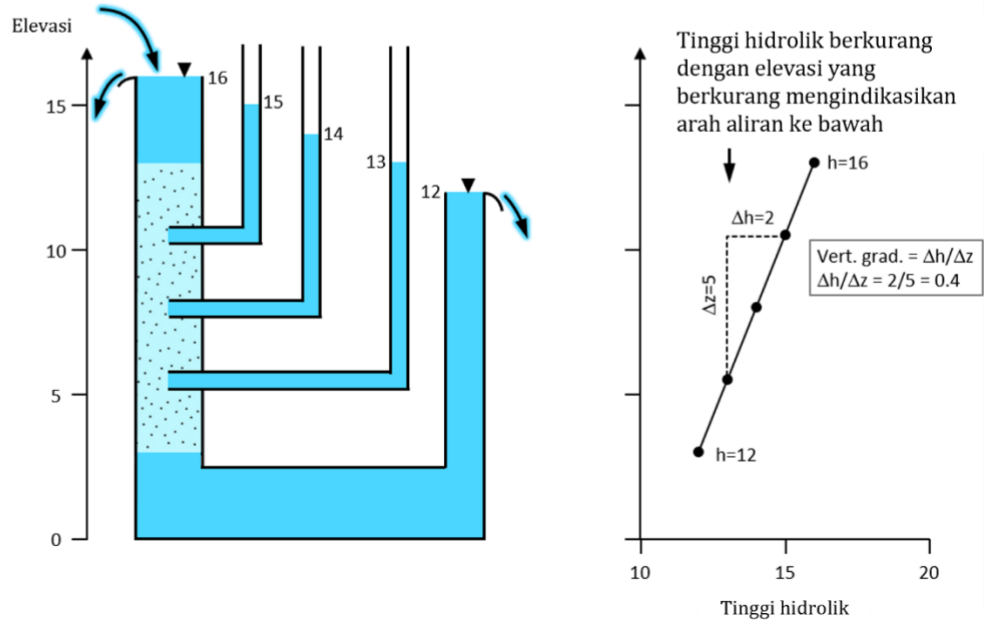
**Gambar 12** - Hubungan antara pengukuran piezometer, distribusi tinggi hidrolik, dan kondisi batas terkait dari pengaturan percobaan. Ini adalah skenario kondisi langgeng untuk sistem dengan kondisi batas tinggi hidrolik tetap (Cohen dan Cherry, 2020).

Gambar 13a menunjukkan pengaturan eksperimen yang mirip, dengan silinder pasir berada pada posisi vertikal. Dengan demikian, menggambarkan tinggi hidrolik sebagai fungsi elevasi menjadi lebih cocok (Gambar 13b). Tinggi hidrolik berkurang dengan penurunan elevasi. Akibatnya, kemiringan hidroliknya bernilai positif (+0,4), tetapi didapati bernilai negatif (-0,4) pada pengaturan horizontal (Gambar 11). Perbedaan tanda ini hanyalah ekspresi penggunaan elevasi sebagai koordinat spasial; Hukum Darcy masih berlaku, dan *air mengalir ke bawah sesuai dengan arah penurunan tinggi hidrolik*.

a) Pengaturan percobaan dan profil tinggi – piezometer tunggal

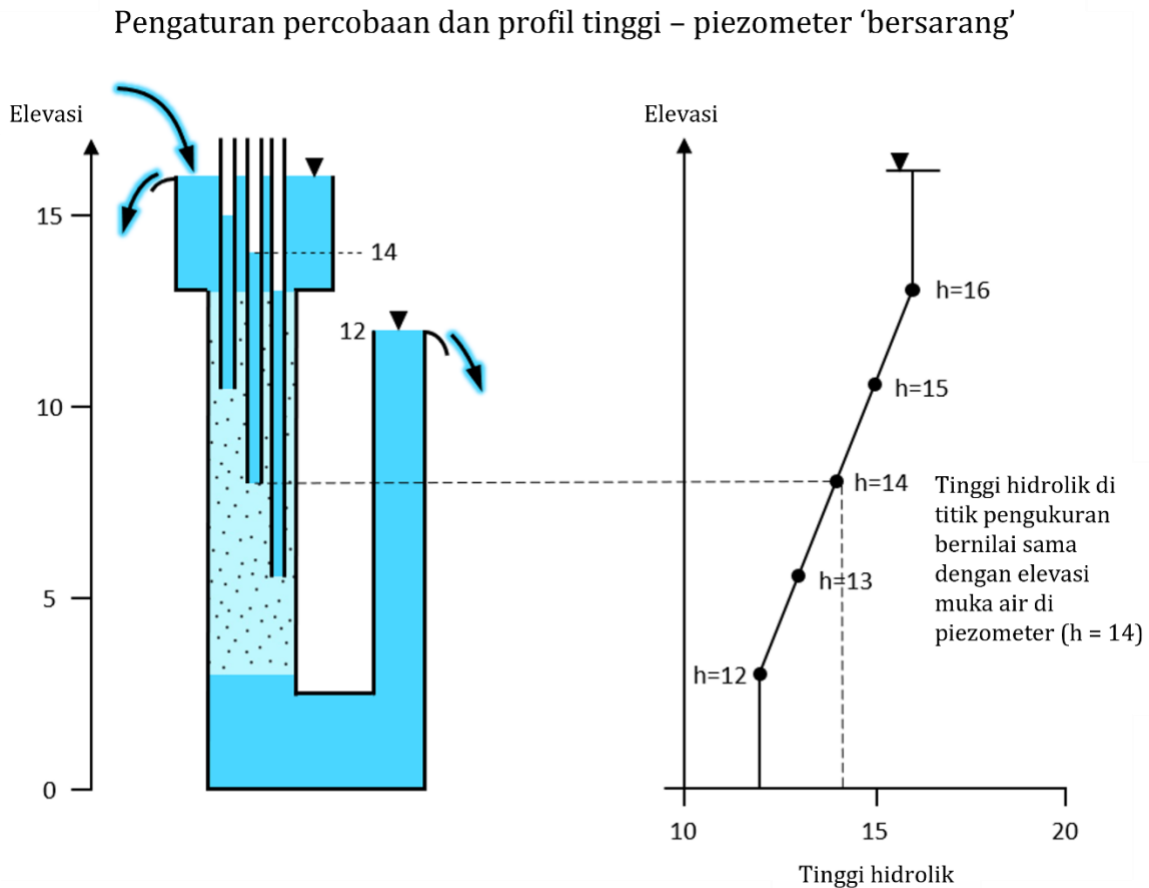


b) Pengaturan percobaan dan profil tinggi – piezometer jamak



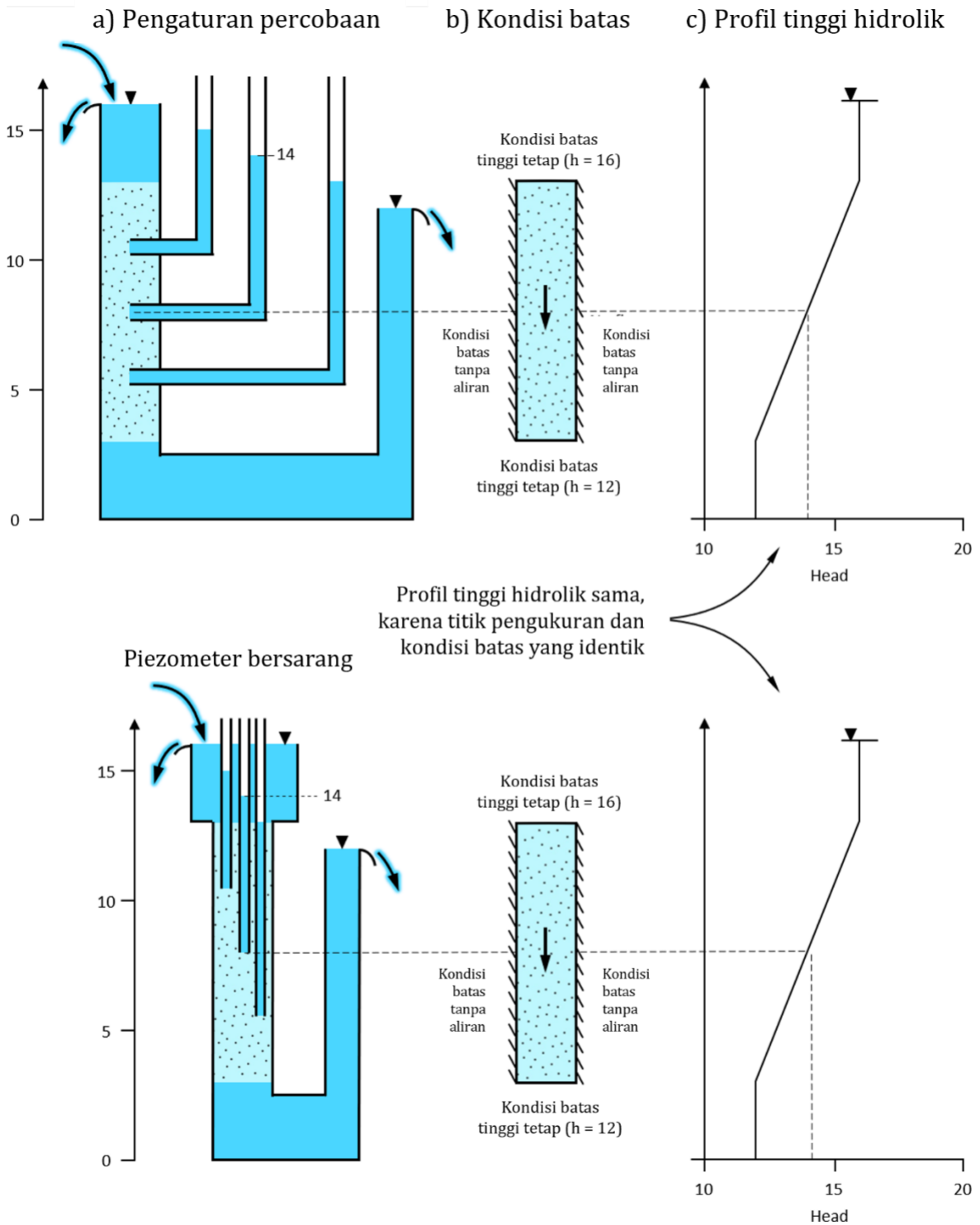
**Gambar 13** - Demonstrasi aliran vertikal dan profil tinggi hidrolik terkait: Profil tinggi hidrolik ditentukan oleh tinggi air yang diukur dalam piezometer dan titik pengukurannya masing-masing, yang merupakan ujung terbuka pada setiap piezometer di kolom pasir. Air mengalir ke bawah, dari tinggi hidrolik yang lebih tinggi ke tinggi hidrolik yang lebih rendah (Cohen dan Cherry, 2020).

Gambar 14 adalah versi modifikasi dari pengaturan percobaan multi-piezometer yang ditunjukkan pada Gambar 13b. Dalam kasus Gambar 14, piezometer-piezometer tersebut dikategorikan sebagai piezometer "bersarang" (*nested piezometer*) karena jaraknya yang berdekatan, namun masing-masing piezometer mengukur tinggi hidrolik pada kedalaman yang berbeda karena ujung terbuka setiap piezometernya (titik pengukuran) terletak pada elevasi yang berbeda.



**Gambar 14** - Profil tinggi hidrolik menggunakan piezometer “bersarang” (*nested piezometer*). Meskipun piezometer diposisikan dekat satu sama lain dan elevasi muka air masing-masing piezometer menurun ke kanan, pengukuran sebenarnya mewakili profil tinggi hidrolik vertikal, karena semua aliran vertikal mengikuti geometri silinder, dan posisi vertikal masing-masing titik pengukuran berbeda (Cohen dan Cherry, 2020).

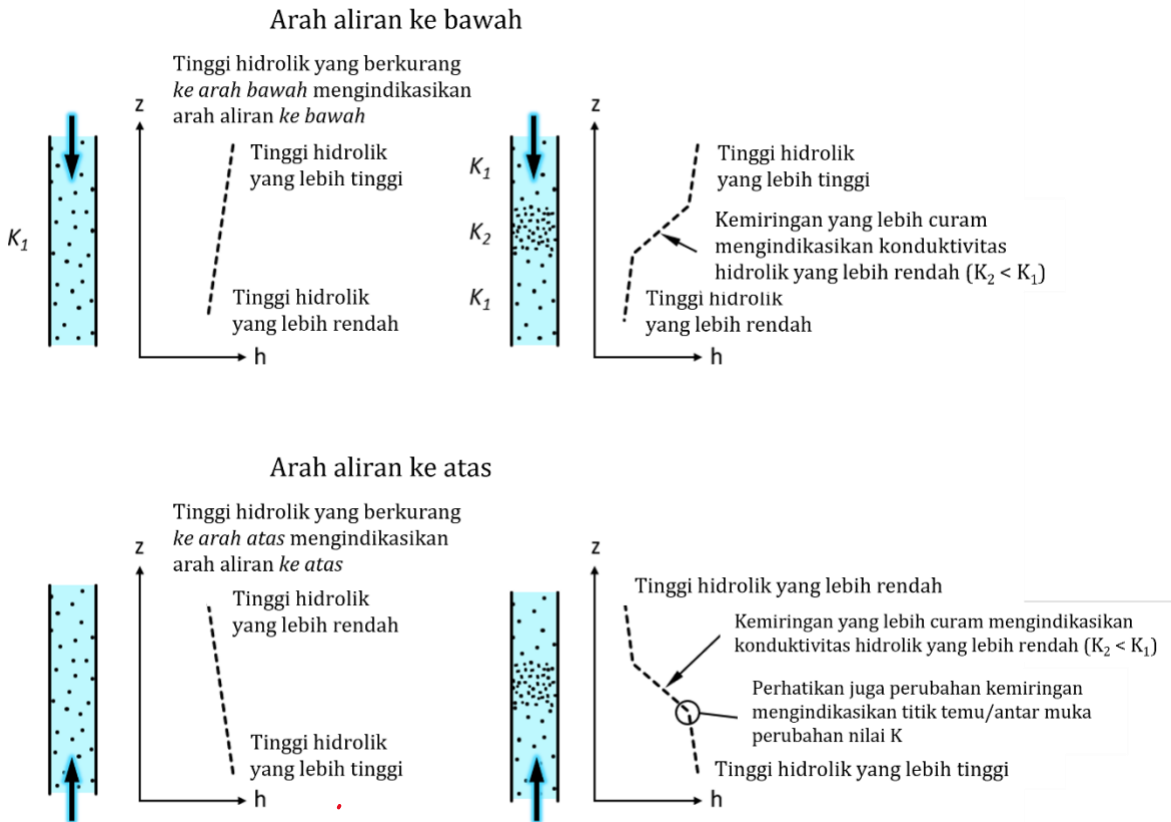
Gambar 15 membandingkan profil tinggi hidrolik yang diukur dengan piezometer pada Gambar 13b dengan konfigurasi piezometer “bersarang” (Gambar 14). Profil tinggi hidrolik yang dihasilkan identik, karena titik pengukuran dan kondisi batasnya juga persis sama.



**Gambar 15** - Perbandingan profil tinggi hidrolik menggunakan orientasi piezometer yang berbeda: a) pengaturan percobaan; b) kondisi batas; dan, c) profil tinggi hidrolik. Profil tinggi hidrolik identik, karena titik pengukuran dan kondisi batas yang persis sama (Cohen dan Cherry, 2020).



Gambar 16 mengilustrasikan kemiringan hidrolik vertikal untuk aliran satu dimensi ke bawah dan ke atas. Hubungan antara kemiringan hidrolik dan konduktivitas hidrolik,  $K$ , ( $-dh/dL \propto 1/K$ ) tetap berlaku; hanya orientasinya saja yang berubah.



**Gambar 16** - Profil tinggi hidrolik vertikal untuk skenario aliran ke bawah dan ke atas. Profil tinggi hidrolik menentukan arah aliran, dan perubahan kemiringan hidrolik menunjukkan variasi nilai konduktivitas hidrolik (Cohen dan Cherry, 2020).

## 4 Garis Ekuipotensial dan Arah Aliran

Setelah memahami konsep mengenai kemiringan hidrolik dan fakta bahwa air tanah mengalir dari lokasi dengan tinggi hidrolik yang lebih tinggi menuju lokasi dengan tinggi hidrolik yang lebih rendah, tujuan dari bagian ini adalah untuk memperkenalkan bagaimana kemiringan hidrolik bermanifestasi dalam bentuk garis ekuipotensial, yang umumnya diplot sebagai *kontur ekuipotensial* pada peta dan penampang melintang. Hal tersebut memberikan metode untuk menyimpulkan arah dan besarnya kemiringan hidrolik dan arah aliran. Memahami cara membuat dan menginterpretasikan peta kontur ekuipotensial dan penampang kontur ekuipotensial sangat penting untuk keberhasilan pengelolaan sumber daya air tanah.

Bagian ini dapat berfungsi sebagai pengenalan mengenai jejaring aliran (*flow nets*). Konstruksi grafis jejaring aliran disajikan dalam buku [Groundwater Project book](#) oleh Poeter dan Hsieh (2020) di mana karakteristik umum garis ekuipotensial dan arah aliran terkait diperkenalkan untuk berbagai kondisi hidrogeologi yang diidealkan. Buku ini membahas profil tinggi hidrolik dan hubungannya dengan kontur ekuipotensial seperti yang diilustrasikan umumnya pada gambar penampang melintang.

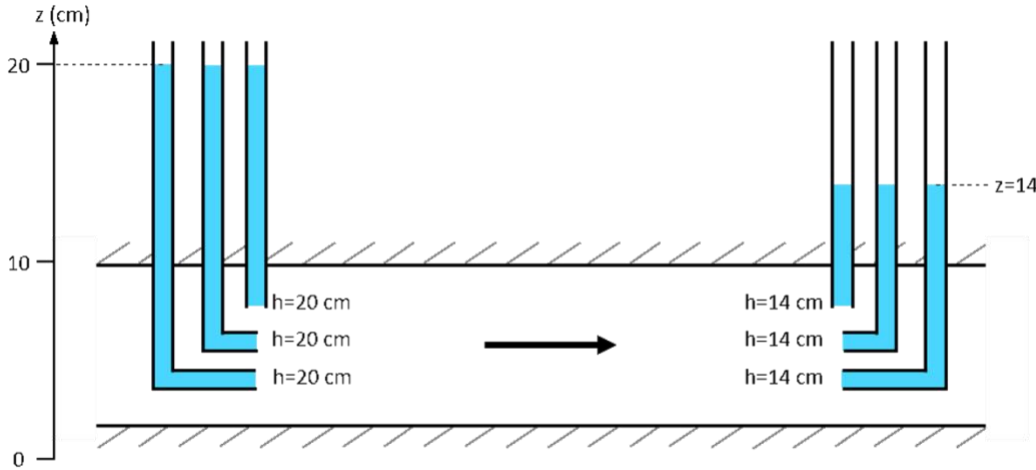
Pembahasan garis ekuipotensial, arah aliran, dan kemiringan hidrolik yang disajikan pada bagian ini berlaku untuk kondisi isotropik ( $K_x=K_y=K_z$ ), yang berarti konduktivitas hidrolik memiliki nilai yang sama bila diukur ke segala arah. Penyederhanaan ini bukanlah kompromi, melainkan pendekatan yang memungkinkan kita untuk lebih mudah memahami konsep dasar yang membentuk fondasi untuk situasi yang lebih kompleks. Faktanya, ketika menganalisis sistem hidrogeologi di lapangan, kita sering mengasumsikan sifat isotropi dalam analisis awal, dan tidak selalu perlu untuk melampaui penyederhanaan ini. Asumsi ini dapat dilonggarkan untuk memperhitungkan kondisi anisotropik, di mana  $K$  tidak sama di semua arah (Woessner and Poeter, 2020).

### 4.1 Pertimbangan Umum

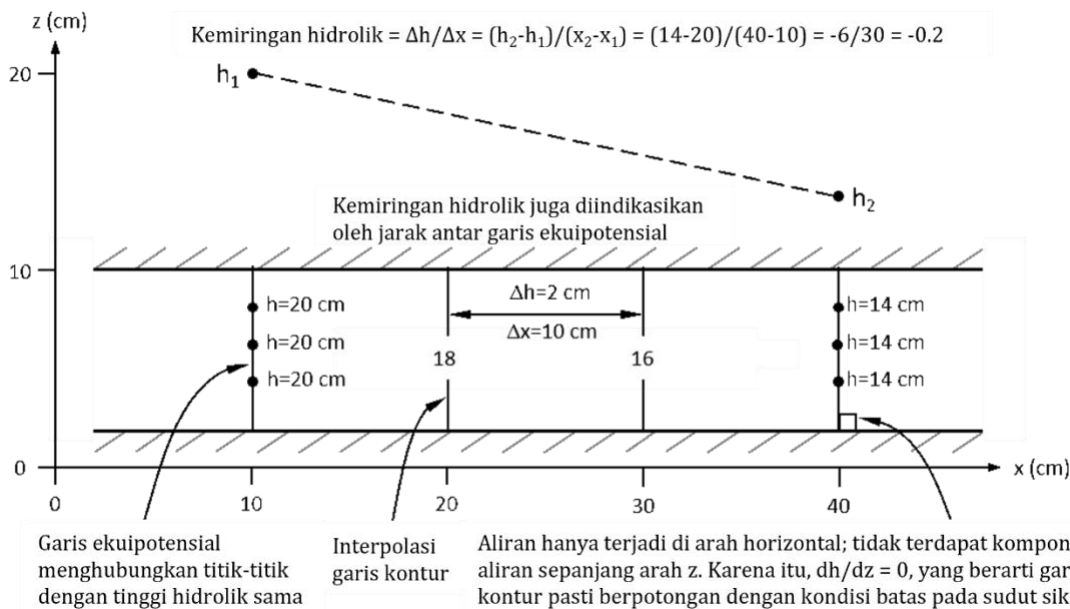
Mari kita pertama-tama mempertimbangkan pengaturan percobaan sederhana untuk mengilustrasikan beberapa aspek paling mendasar dari kontur ekuipotensial dan arah aliran yang terkait (untuk media isotropik). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17, piezometer dimasukkan ke berbagai kedalaman di kedua sisi silinder horizontal yang diisi dengan media berpori jenuh air di mana air mengalir dalam kondisi laminar (dengan kata lain, air mengalir menurut hukum Darcy). Karena elevasi muka air dalam piezometer mewakili tinggi hidrolik *pada titik pengukuran* (ujung terbuka di bagian bawah setiap piezometer), tinggi hidrolik di ketiga titik di sisi kiri ( $x_1=10$  cm) sama dengan 20 cm ( $h_1=20$  cm). Demikian pula, tinggi hidrolik pada ketiga titik di sisi kanan ( $x_2=40$  cm) adalah 14 cm ( $h_2=14$  cm). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17b, *kontur ekuipotensial menghubungkan titik-titik dengan tinggi hidrolik yang sama*. Dengan kata lain, *tinggi hidrolik di semua titik sepanjang kontur ekuipotensial adalah sama*. Dengan demikian, tidak ada kemiringan hidrolik

sepanjang kontur ekuipotensial dan *vektor kemiringan hidrolik* harus ortogonal (yaitu, pada 90°) terhadap garis kontur. Dengan kata lain, arah aliran adalah orthogonal, atau tegak lurus, terhadap kontur ekuipotensial untuk kondisi isotropik.

a) Pengaturan percobaan



b) Profil tinggi hidrolik, kemiringan, dan kontur ekuipotensial



**Gambar 17** - Garis kontur tinggi hidrolik dan ekuipotensial untuk aliran 1D: a) pengaturan percobaan dan b) profil tinggi hidrolik, kemiringan hidrolik, dan garis kontur ekuipotensial. Pengukuran piezometer memungkinkan penentuan kontur ekuipotensial, yang mencerminkan arah aliran (ke kanan dari tinggi hidrolik yang lebih tinggi ke tinggi hidrolik yang lebih rendah) dan kemiringan hidrolik (Cohen dan Cherry, 2020).

Pengukuran pada setiap lokasi menunjukkan bahwa kemiringan hidrolik pada arah z adalah nol. Artinya, tinggi hidrolik tidak berubah pada arah z ( $\Delta h / \Delta z = 0$ ), yang konsisten dengan fakta bahwa air tidak dapat mengalir ke arah vertikal karena adanya sisi kedap air (“batas tanpa aliran”) dari silinder horizontal. Ketiadaan kemiringan vertikal yang

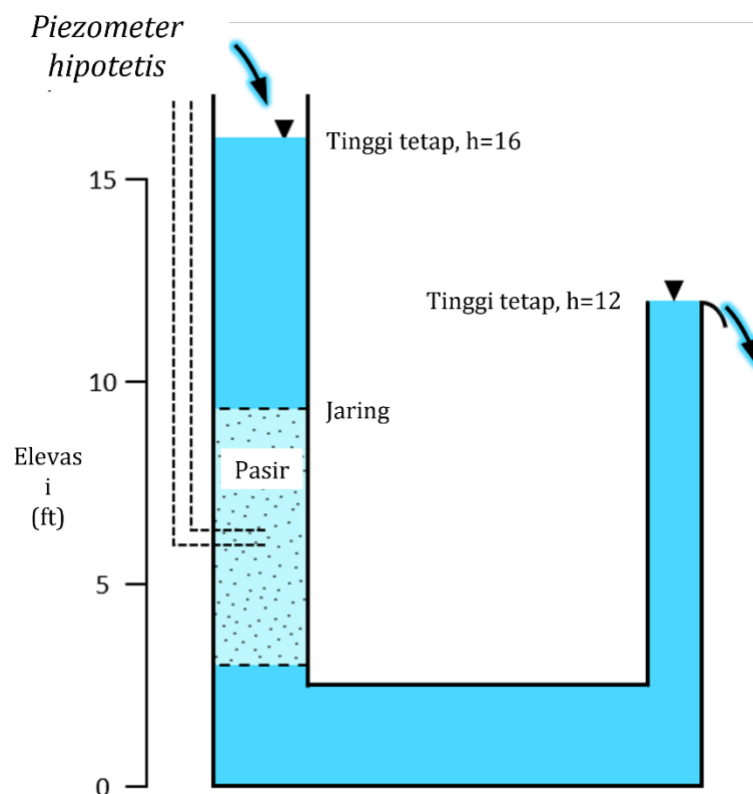
bersebelahan dengan kondisi batas dinyatakan melalui garis ekuipotensial yang tegak lurus dengan batas tanpa aliran.

Gambar 17 juga memperlihatkan profil tinggi hidrolik horizontal (kemiringan hidrolik horizontal). Perhatikan bahwa kemiringan hidrolik dapat diukur dengan menggunakan profil tinggi hidrolik dan dengan menggunakan kontur ekuipotensial.

Jika perbedaan tinggi hidrolik antara kumpulan piezometer lebih kecil, kemiringan hidrolik akan juga lebih kecil (profil tinggi hidrolik tidak akan terlalu curam dan jarak antara garis kontur ekuipotensial berjarak 2 cm akan lebih besar).

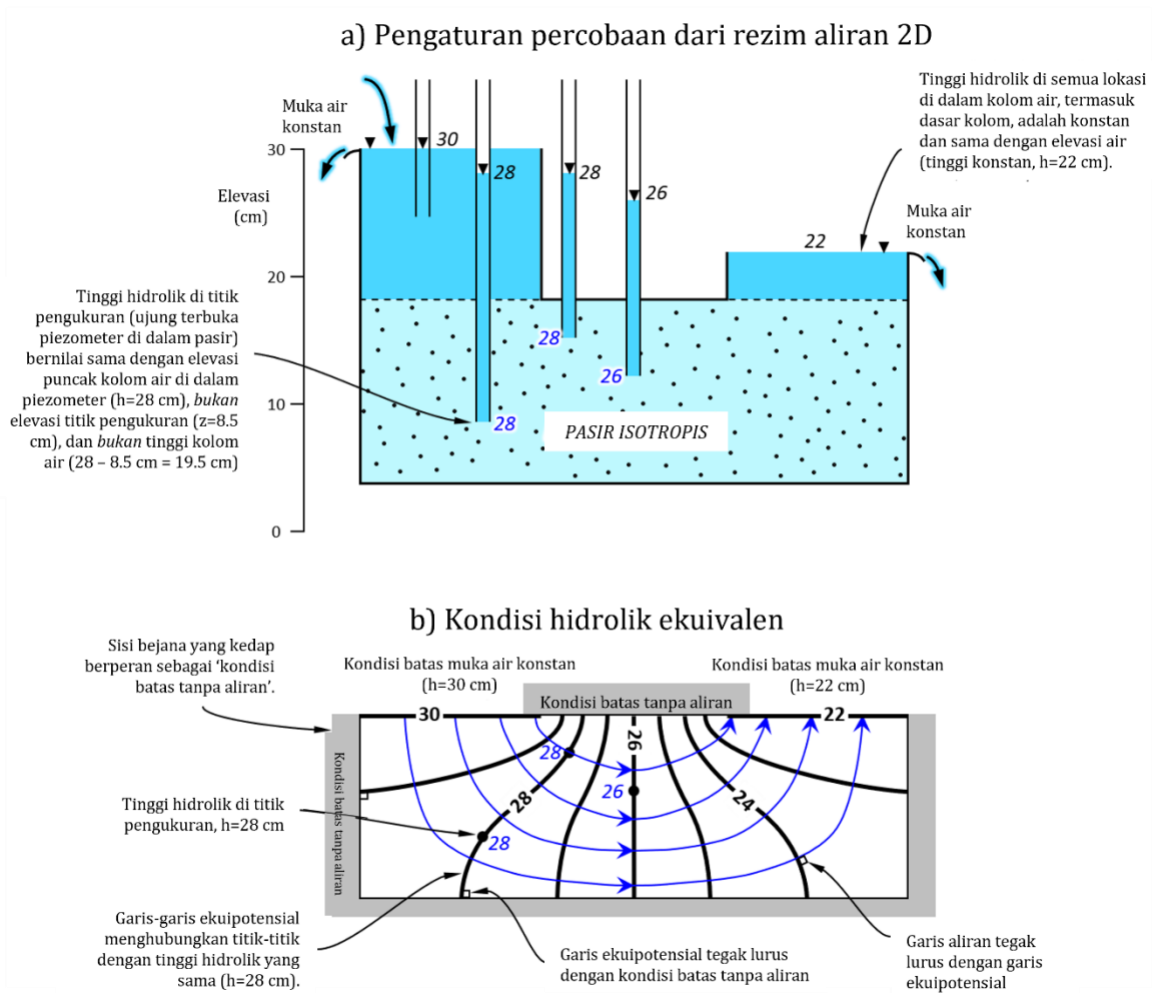
### Contoh Soal 3

- Gambar garis ekuipotensial dalam pasir dengan interval 1 ft.
- Hingga i berapakah air di dalam piezometer dalam soal akan naik?



[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 3](#)

Setelah menetapkan elemen dasar dari kontur ekuipotensial untuk aliran satu dimensi dan arah aliran air tanah yang terkait, amati pengaturan percobaan dan representasi hidrolik terkait dari aliran dua dimensi pada Gambar 18. Geometri aliran secara keseluruhan terjadi sesuai ekspektasi kita, berdasarkan tinggi hidrolik di kondisi batas tinggi hidrolik konstan, aliran kiri ke kanan, dan perlu ada setidaknya beberapa komponen aliran vertikal karena geometri sistem yang tertutup dan lokasi dari kondisi batas. Seperti sebelumnya, kontur ekuipotensial berpotongan dengan kondisi batas tanpa aliran pada sudut siku-siku. Selain itu, garis kontur ekuipotensial pada kondisi batas tinggi hidrolik konstan ditentukan oleh elevasi muka air pada kondisi batas tersebut, yang diilustrasikan pada Gambar 12. Perhatikan juga bahwa karena media berpori bersifat isotropik, garis aliran saling bersinggungan dengan kontur ekuipotensial pada sudut siku-siku ( $90^\circ$ ).



**Gambar 18** – Pengaturan peralatan percobaan untuk mengilustrasikan aliran 2D: a) pengaturan percobaan rezim aliran dua dimensi dan b) kondisi hidrolik yang sesuai. Kondisi batas mengindikasikan pengaturan percobaan, dan lokasi relatif serta jenis kondisi batas menentukan geometri aliran dan kontur ekuipotensial terkait (Cohen dan Cherry, 2020).

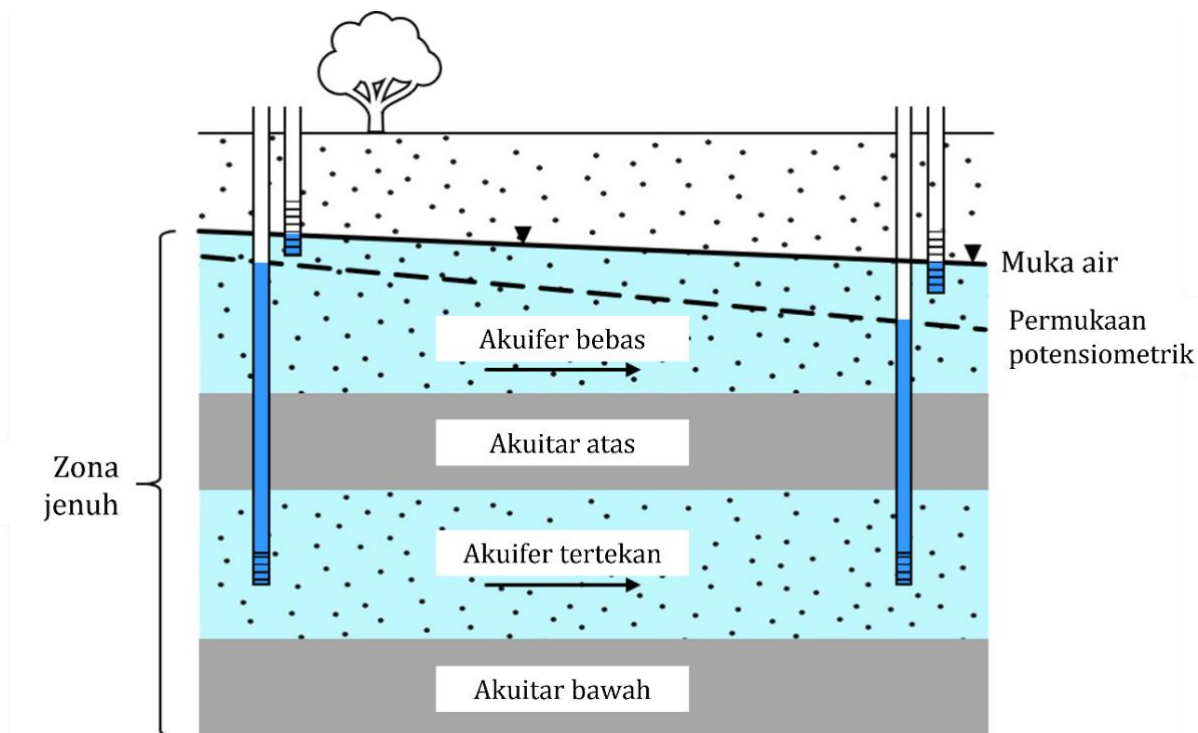
## 5 Aliran Langgeng Jenuh dalam Skala Lapangan

Pada skala lapangan, tinggi hidrolik dapat diukur dengan menggunakan berbagai jenis sumur (baik yang dipasang terpisah, dalam susunan yang berkelompok secara spasial, atau pada lokasi horizontal yang sama tetapi pada kedalaman yang berbeda-beda). Sumur air tanah pada dasarnya adalah versi skala besar dari piezometer skala laboratorium yang telah kita gunakan untuk mengilustrasikan hukum Darcy di bagian sebelumnya. Bagian berikut menyajikan hubungan tinggi hidrolik dan aliran dalam tiga tipe dasar formasi hidrogeologi (akuifer tertekan, akuitar, akuifer bebas) di zona jenuh, seperti yang dijelaskan pada bagian ini dan ditunjukkan pada Gambar 19.

*Akuifer tertekan* dibatasi di bagian atas dan bawahnya oleh *akuitar*, yang merupakan formasi semi-tembus air yang membatasi aliran antara akuifer di atas dan/atau di bawahnya.

Elevasi muka air di sumur yang dipasang di akuifer tertekan akan lebih tinggi dari dasar akuitar di atasnya. Interpolasi elevasi air yang diukur antar sumur dalam akuifer terbatas menentukan *tinggi potensiometrik*.

*Akuifer bebas* dibatasi hanya pada bagian bawahnya oleh akuitar. Bagian atas akuifer bebas adalah *muka air tanah*, yang merupakan elevasi muka air di sumur dengan saringan, yang cukup dalam untuk menyentuh permukaan air tanah.

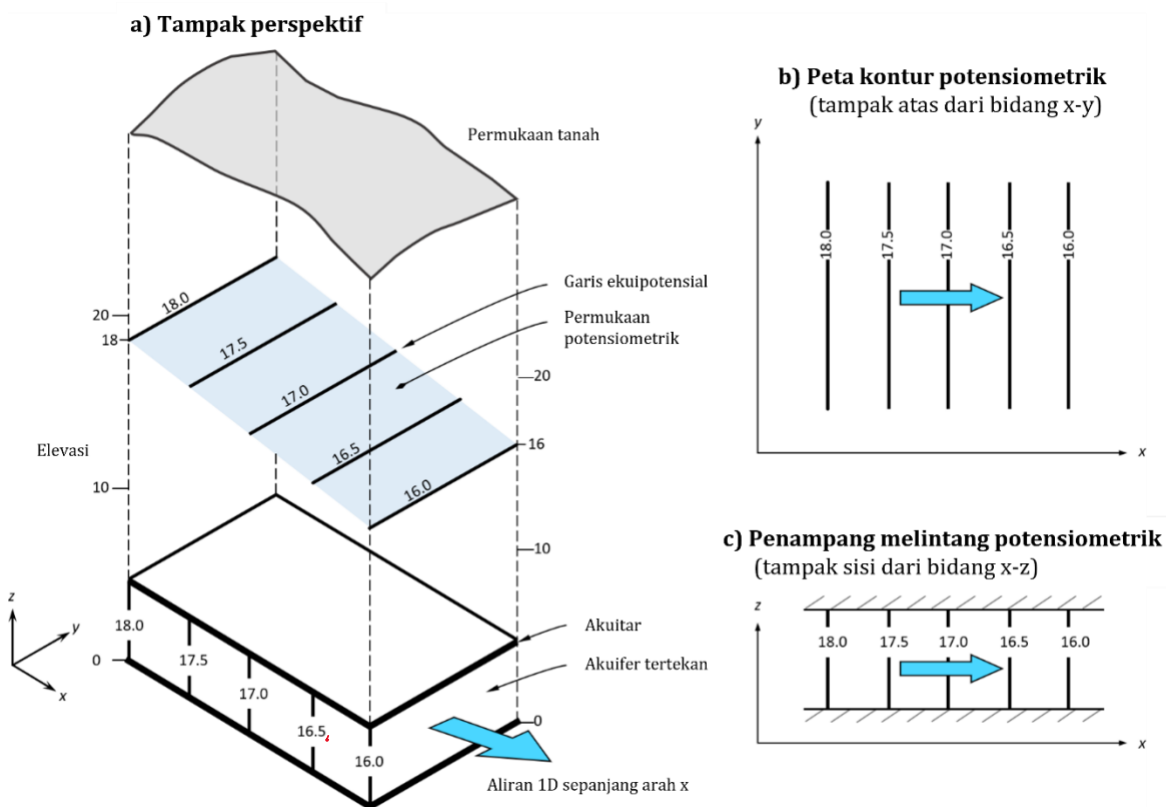


**Gambar 19** - Skema penampang akuifer bebas dan tertekan, dipisahkan oleh akuitar. Akuifer bebas, akuifer tertekan, dan akuitar semuanya berada dalam kondisi jenuh air dan oleh karena itu terhubung secara hidrolik (Cohen dan Cherry, 2020).

### 5.1 Sifat Hidrolik Aliran pada Akuifer Tertekan

Pada bagian sebelumnya, berbagai susunan percobaan yang digunakan untuk mengilustrasikan konsep tinggi hidrolik dan aliran serupa dengan yang ada di akuifer tertekan, karena akuifer tertekan dibatasi oleh lapisan-lapisan dengan konduktivitas hidrolik rendah relatif dibandingkan akuifer. Ketika lapisan pembatas memiliki konduktivitas hidrolik yang jauh lebih rendah daripada akuifer, lapisan pembatas bertindak dengan perilaku yang mirip dengan kondisi batas tanpa aliran, karena mereka membatasi hampir semua aliran yang melintasi akuifer, yang merupakan kasus untuk semua skenario percobaan yang disajikan sebelumnya. Dalam sebagian besar kondisi alami, sejumlah air dapat bermigrasi melintasi akuifer yang jenuh air sesuai dengan hukum Darcy jika ada kemiringan hidrolik sepanjang akuifer.

Dasar aliran dalam akuifer tertekan adalah konsep tinggi potensiometrik. Gambar 20 memberikan pengertian tentang mengapa konsep tersebut dapat diterapkan pada kondisi tertekan; tinggi potensiometrik sebenarnya adalah permukaan imajiner (Gambar 20a) yang dapat didefinisikan menggunakan kontur ekuipotensial yang dilihat pada bidang xy (Gambar 20b). Kita sudah terbiasa dengan representasinya dalam penampang melintang (Gambar 20c). Pengaruh akuifer pada aliran terbatas disajikan pada Bagian 5.3.



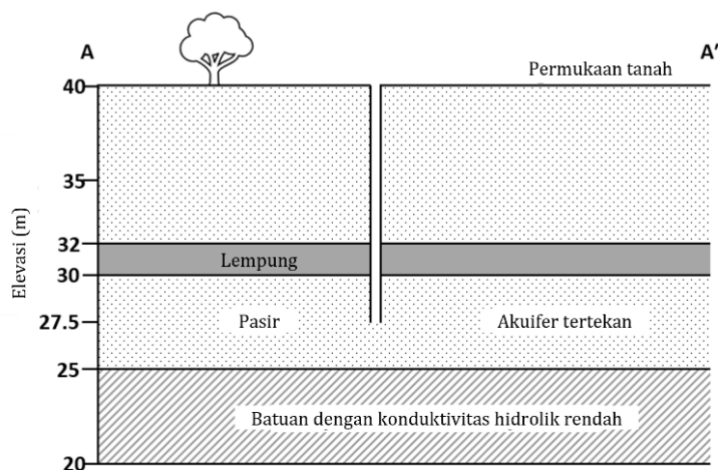
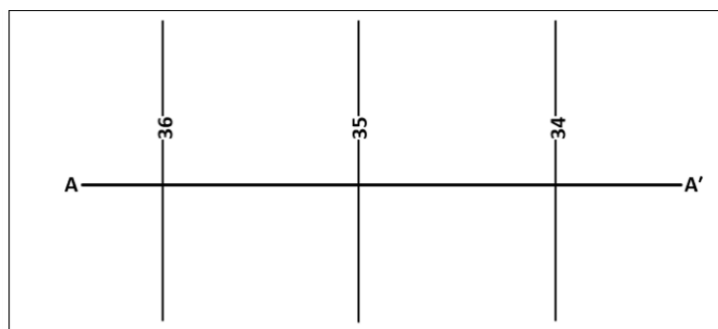
**Gambar 20** - Kontur potensiometrik untuk akuifer tertekan ditunjukkan dalam berbagai tampilan: a) perspektif; b) tampak atas, dan, c) potongan melintang. Dalam tampilan tampak atas, tinggi potensiometrik dapat direpresentasikan menggunakan garis ekuipotensial dengan cara yang mirip dengan garis kontur elevasi yang digunakan untuk merepresentasikan topografi permukaan tanah (Cohen dan Cherry, 2020).



### Contoh Soal 4

Gambar-gambar di bawah ini menunjukkan peta kontur potensiometri dari akuifer tertekan dan penampang melintang sepanjang garis A-A'. Berapa kedalaman permukaan air di sumur (relatif terhadap permukaan tanah)? Jelaskan.

- a) 3 m
- b) 5 m
- c) 7.5 m
- d) 10 m

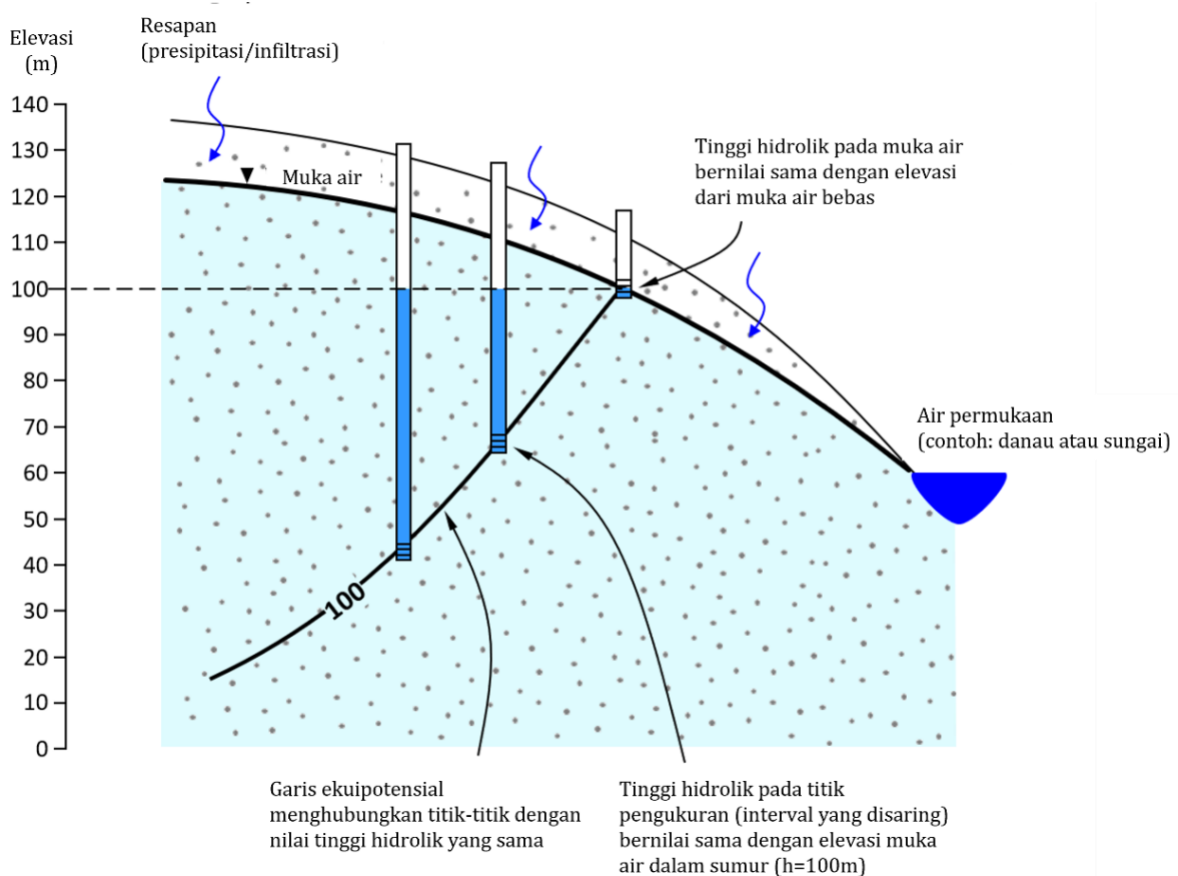


[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 4](#) ↴



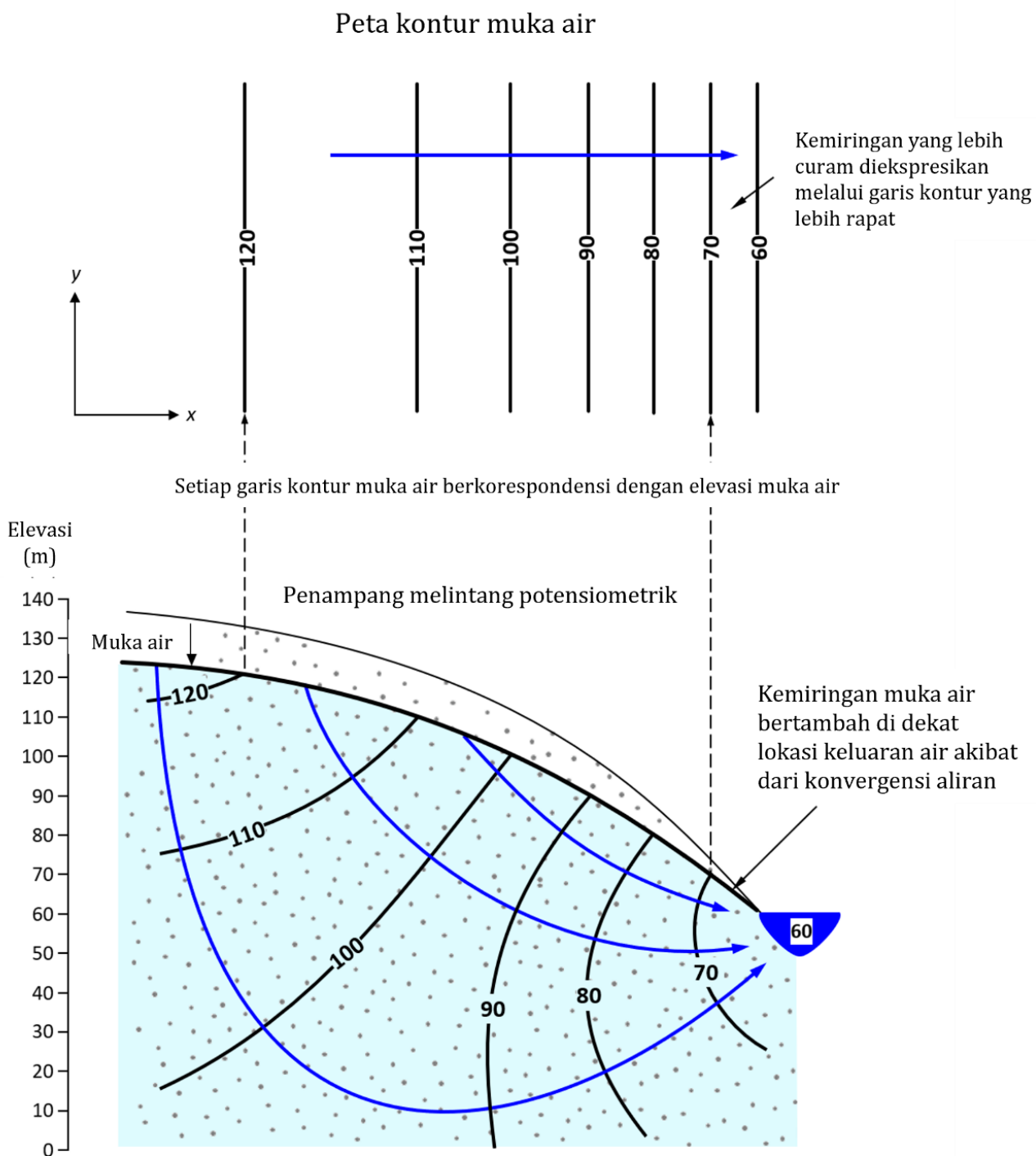
## 5.2 Sifat Hidrolik Aliran pada Akuifer Bebas

Aliran air tanah pada akuifer bebas mengikuti prinsip yang sama dengan aliran pada akuifer tertekan dengan unsur tambahan; elevasi bagian atas zona jenuh mewakili "muka air", yang merupakan elevasi muka air di sumur dengan saringan, yang cukup dalam untuk menyentuh permukaan air tanah. Sebagai contoh, tinggi hidrolik muka air yang berpotongan oleh sumur dangkal yang ditunjukkan pada Gambar 21 adalah 100 m. Selain itu, konsisten dengan diskusi sebelumnya, kontur ekuipotensial menghubungkan titik-titik dengan tinggi hidrolik yang sama, yang diukur menggunakan sumur (piezometer skala lapangan). Muka air tanah bukanlah garis ekuipotensial; muka air tanah memiliki tinggi hidrolik yang bervariasi karena elevasi muka airnya bervariasi.



**Gambar 21** - Kontur ekuipotensial dalam akuifer bebas; garis kontur menghubungkan titik-titik dengan tinggi hidrolik yang sama dan memanjang hingga ke muka air tanah dengan elevasi muka air yang sama (Cohen dan Cherry, 2020).

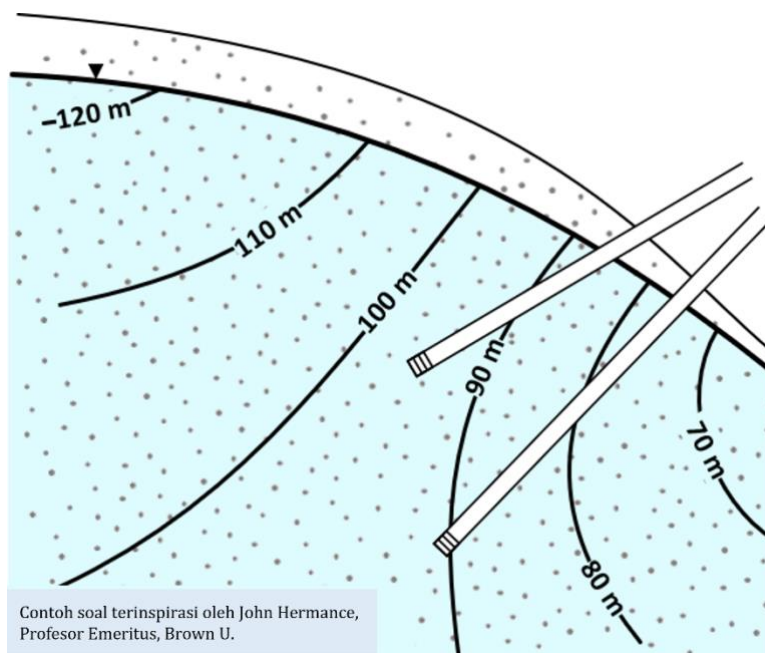
Gambar 22 menunjukkan bahwa muka air tanah juga dapat direpresentasikan dalam tampilan peta. Setiap garis kontur mewakili muka air tanah pada elevasi yang sama. Perhatikan juga bahwa kemiringan muka air tanah meningkat (lebih curam dan jarak antar garis kontur lebih dekat) dalam arah aliran karena aliran konvergen, yang menurunkan luas penampang aliran, seperti yang ditunjukkan sebelumnya pada Gambar 5.



**Gambar 22** - Potongan melintang potensimetri, arah aliran air tanah (panah biru), dan peta kontur muka air tanah dalam akuifer bebas ideal. Peta kontur mewakili topografi permukaan air tanah dan dapat digunakan untuk menyimpulkan arah umum aliran. Geometri aliran di bawah muka air tanah ditentukan oleh kontur ekuipotensial pada penampang melintang (Cohen dan Cherry, 2020).

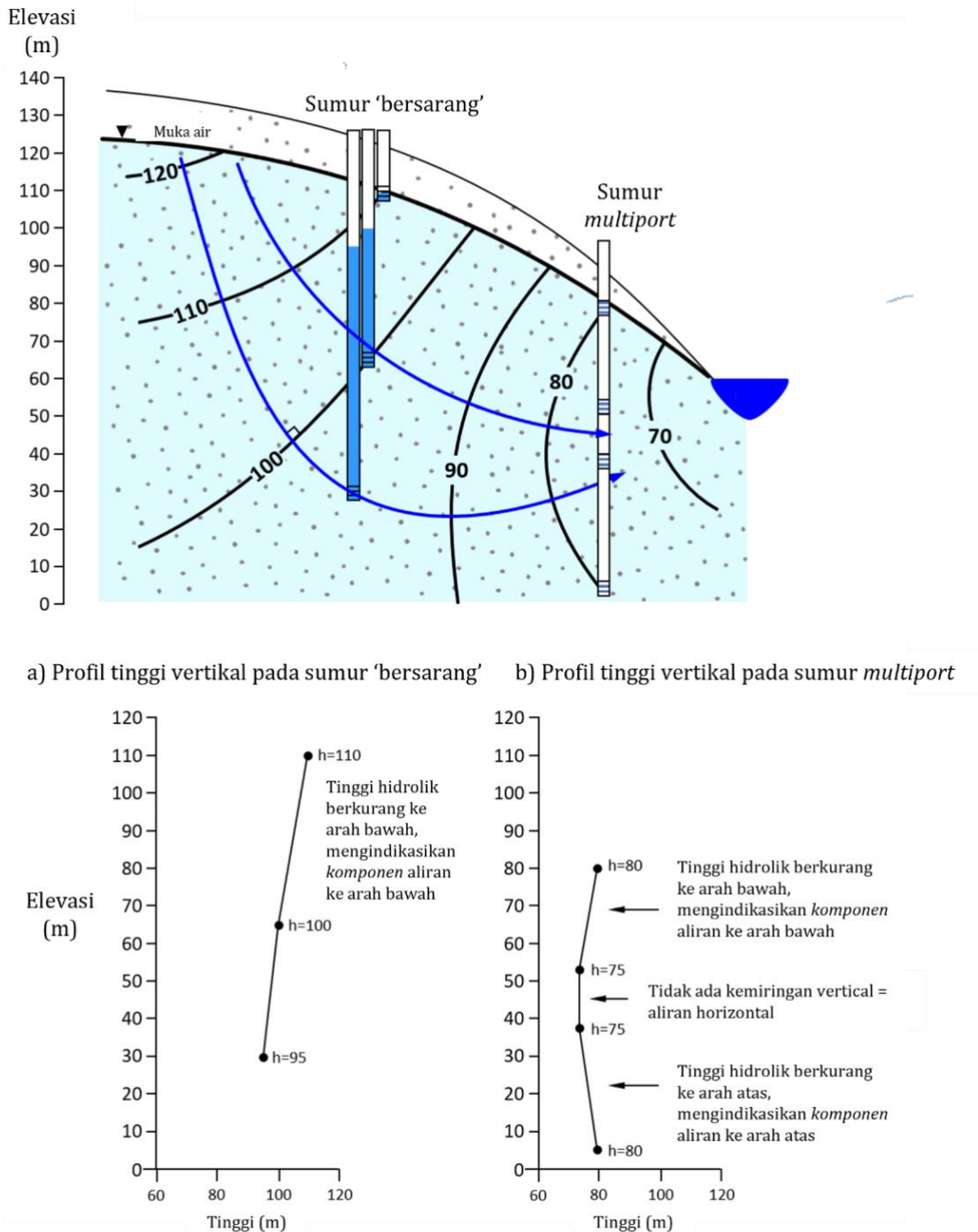
### Contoh Soal 5

Hingga elevasi berapakah air di dalam sumur miring akan naik?



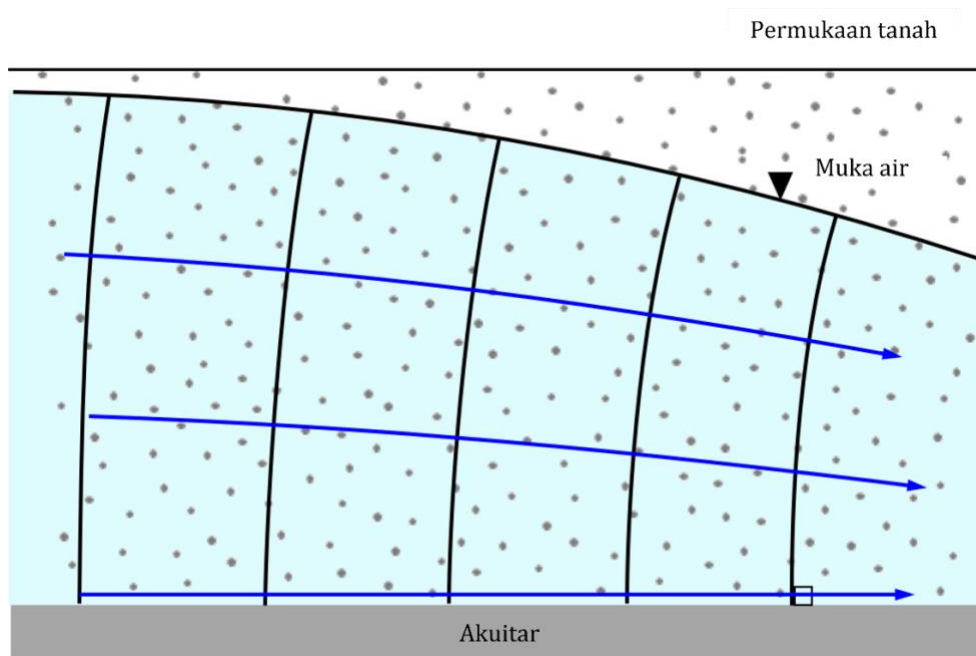
[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 5](#) ↴

Gambar 23 menunjukkan profil tinggi hidrolik vertikal yang diukur dalam sumur “bersarang”. Data ini juga dapat diukur dalam sumur bertingkat (*multiport*), misalnya. Yang penting, gambar tersebut menunjukkan bahwa meskipun ada kemiringan vertikal, aliran juga memiliki komponen horizontal. Artinya, adanya kemiringan vertikal tidak selalu menunjukkan bahwa aliran sepenuhnya vertikal, tetapi hanya komponen aliran saja yang vertikal.



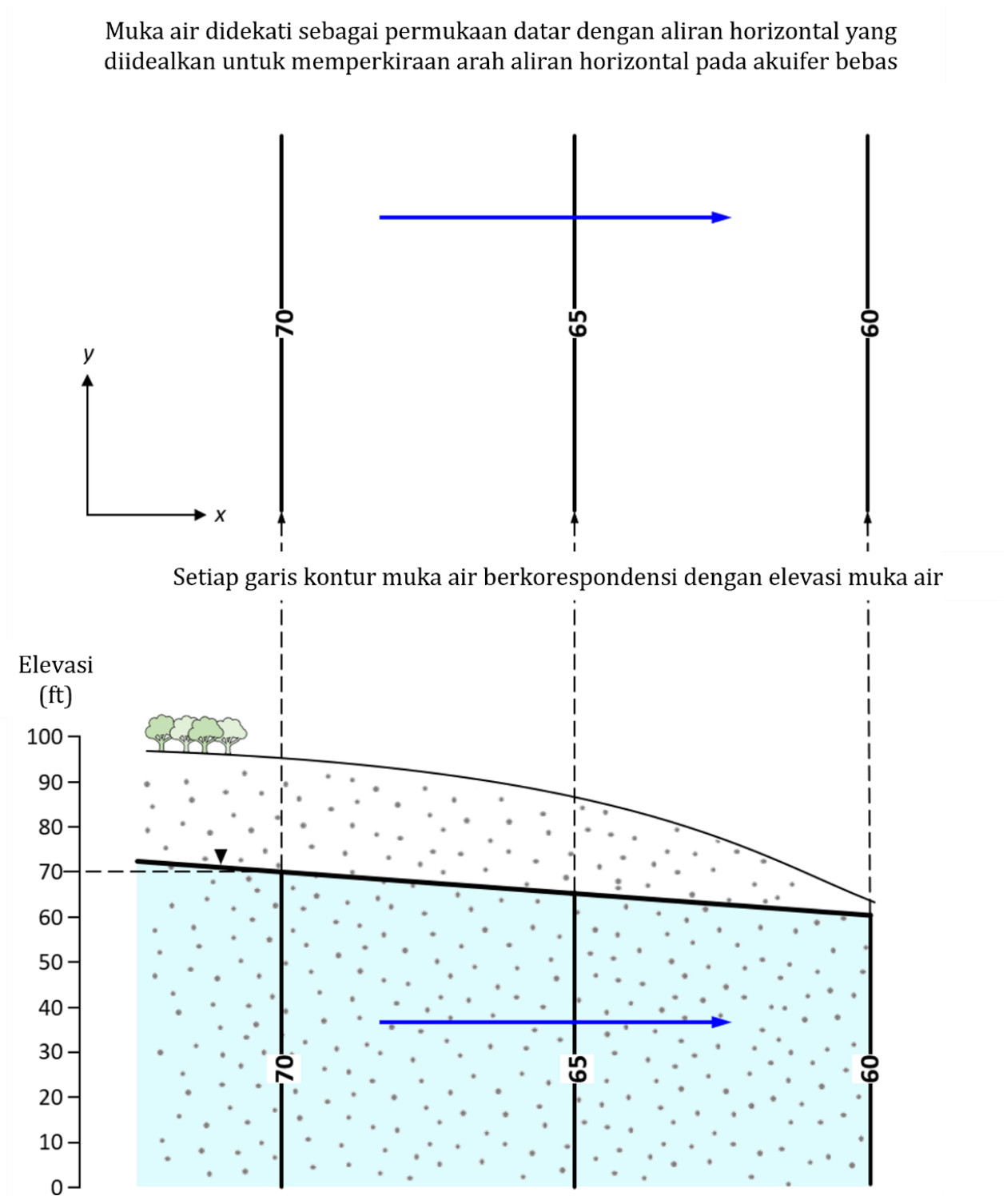
**Gambar 23** – Contoh profil tinggi hidrolik vertikal pada akuifer bebas ideal (Cohen dan Cherry, 2020).

Kontur potensiometri dan geometri aliran dalam skenario akuifer bebas yang ditunjukkan pada Gambar 23 mewakili kasus di mana kondisi batas tanpa aliran vertikal ada di dekat ujung sistem (sisi kiri). Kondisi batas ini memiliki efek yang menyebabkan aliran vertikal yang signifikan di wilayah itu (lihat Gambar 18 untuk pengaturan peralatan dan kontur percobaan yang sebanding). Dalam banyak contoh, kondisi batas tanpa aliran mungkin tidak berada di dekatnya, dan aliran di area yang diinginkan sebagian besar bersifat horizontal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 24.



**Gambar 24** – Mayoritas aliran horizontal dalam akuifer bebas. Kontur potensiometri ortogonal terhadap akuitar, yang memiliki konduktivitas hidrolik ( $K$ ) yang sangat rendah sehingga berperilaku sebagai kondisi batas tanpa aliran (Cohen dan Cherry, 2020).

Dalam praktiknya, aliran horizontal dalam akuifer bebas sering diasumsikan sebagai aliran hanya dalam arah horizontal, terutama ketika diestimasi pada skala sub-regional dan berada jauh dari kondisi batas, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 25.

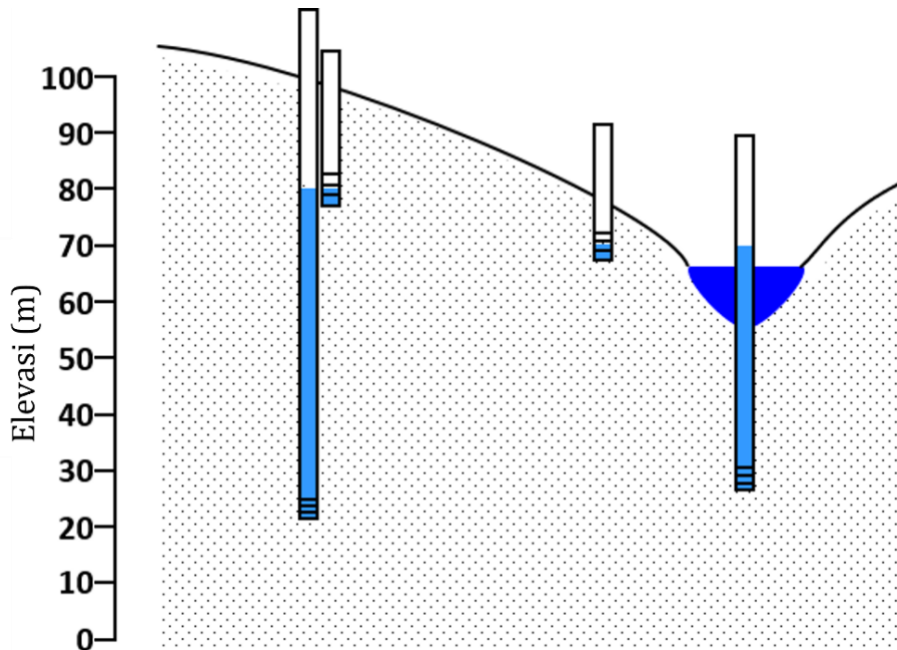


**Gambar 25** – Muka air tanah digambarkan pada permukaan datar dengan arah aliran melalui penampang melintang dominan pada arah horizontal (Cohen dan Cherry, 2020).



### Contoh Soal 6

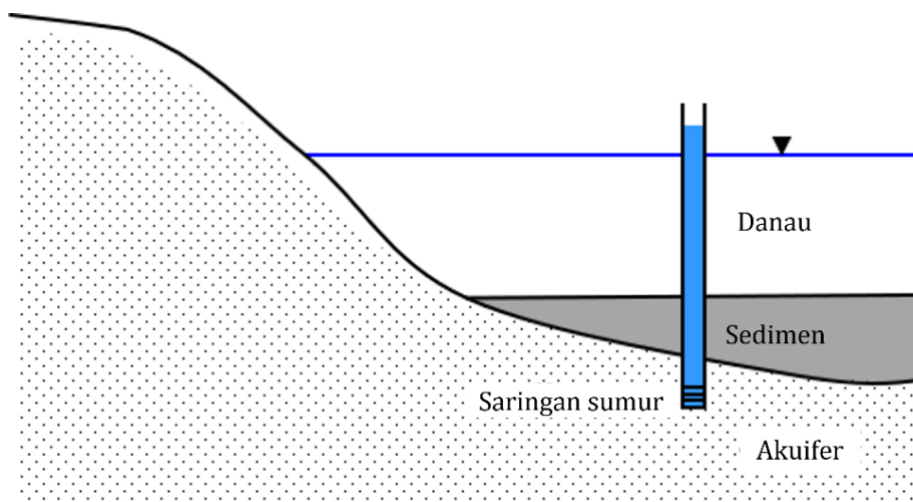
- Gambar muka air.
- Gambar kontur ekuipotensial 70 m, 75 m, dan 80 m, serta sketsa beberapa garis aliran.



[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 6](#)

### Contoh Soal 7

- Sebuah piezometer dimasukkan ke dalam akuifer di bawah sedimen (K rendah) sebuah danau, dan air naik ke elevasi yang stabil seperti yang ditunjukkan di bawah ini. Muka air yang ada tidak ditampilkan. Apakah air mengalir ke atas atau ke bawah melalui sedimen? Jelaskan.
- Gambar representasi skematis dari profil tinggi hidrolik vertikal, memanjang dari permukaan air danau ke saringan sumur.

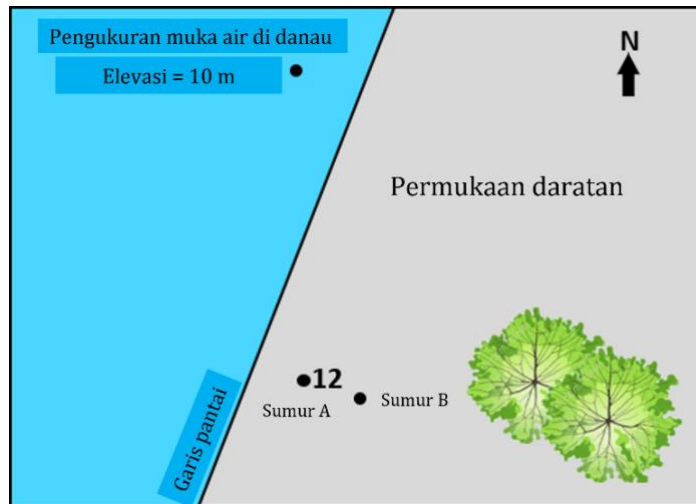


[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 7](#)

### Contoh Soal 8

Gambar di bawah ini adalah tampilan peta danau dan garis pantai. Elevasi muka air di Sumur A adalah 12 m. Asumsikan muka air tanah planar (bidang miring), berapa perkiraan elevasi muka air di Sumur B?

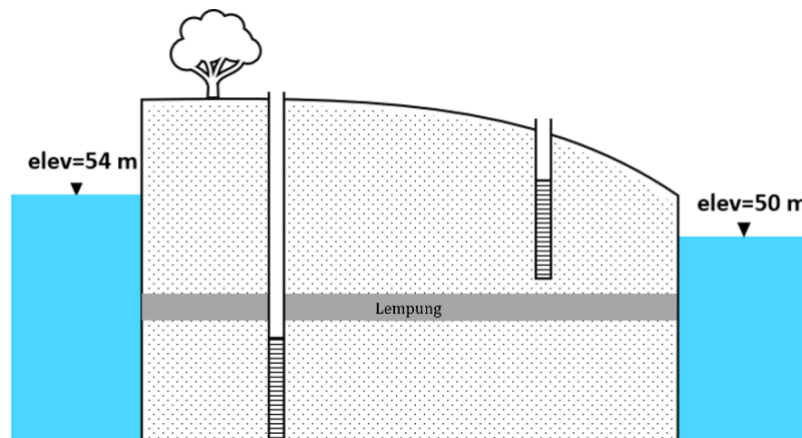
- a) 12 m
- b) 13 m
- c) 14 m
- d) Sebuah nilai antara 12 m dan 13 m



[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 8](#)

### Contoh Soal 9

Perkirakan elevasi muka air di masing-masing sumur dan tentukan apakah terdapat aliran secara vertikal melalui lapisan akuitar lempung.

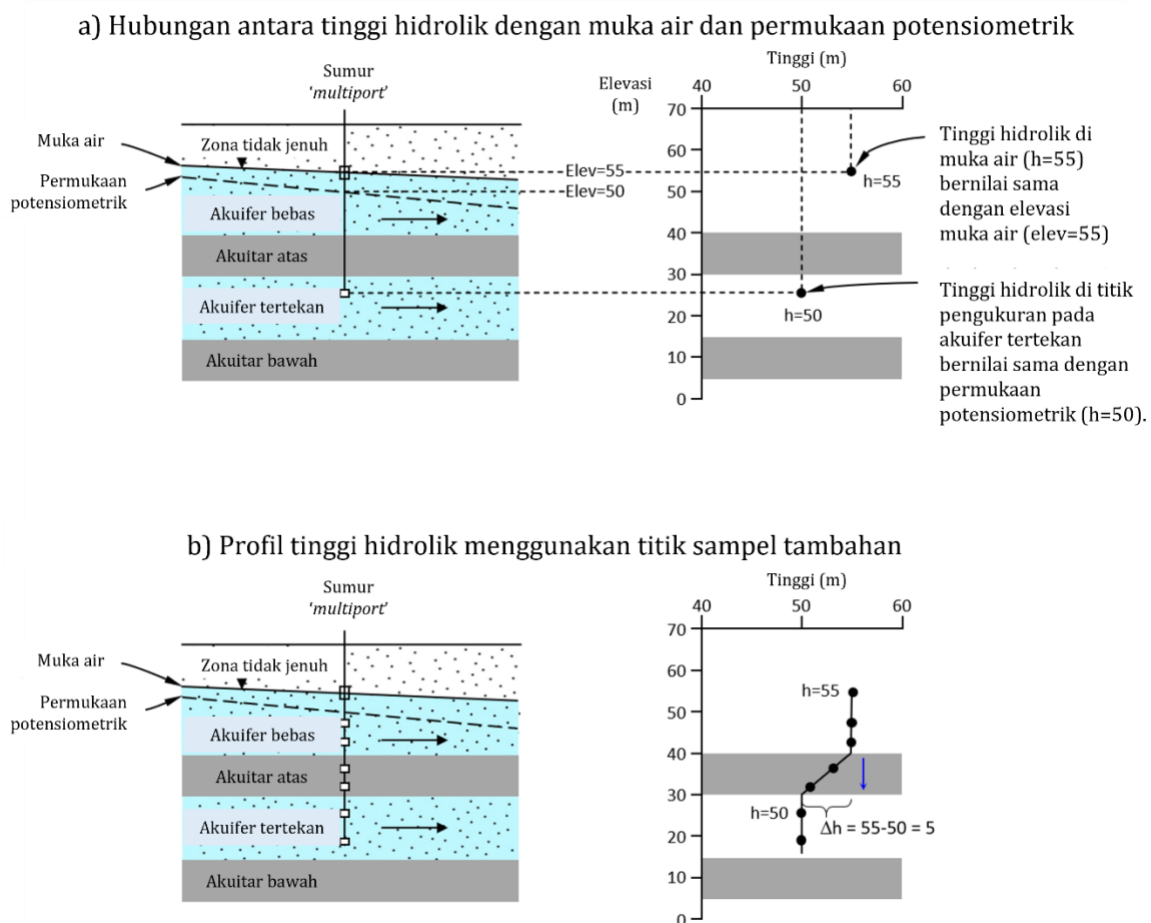


[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 9](#)



### 5.3 Akuifer dan Akuitar

Aliran dan skenario kemiringan hidrolik terkait yang ditunjukkan pada gambar sebelumnya juga terdapat pada akuifer yang dipisahkan oleh akuitar. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 26, kemiringan horizontal pada akuifer bebas dan akuifer tertekan masing-masing ditentukan oleh muka air dan permukaan potensiometri. Pada Gambar 26, tinggi hidrolik menurun ke arah kanan pada kedua akuifer. Dengan demikian, air tanah mengalir ke arah kanan. Namun, ada perbedaan tinggi hidrolik di atas dan di bawah akuitar, seperti yang ditunjukkan oleh nilai tinggi hidrolik yang ditandai pada penampang melintang. Nilai-nilai ini didasarkan pada muka air dan permukaan potensiometri. Gambar 26a mengilustrasikan muka air dan permukaan potensiometri, serta menunjukkan tinggi hidrolik di dua kedalaman berbeda pada grafik di sebelah kanan. Gambar 26b menunjukkan skenario yang sama menggunakan sumur *multiport* dengan banyak titik sampel.



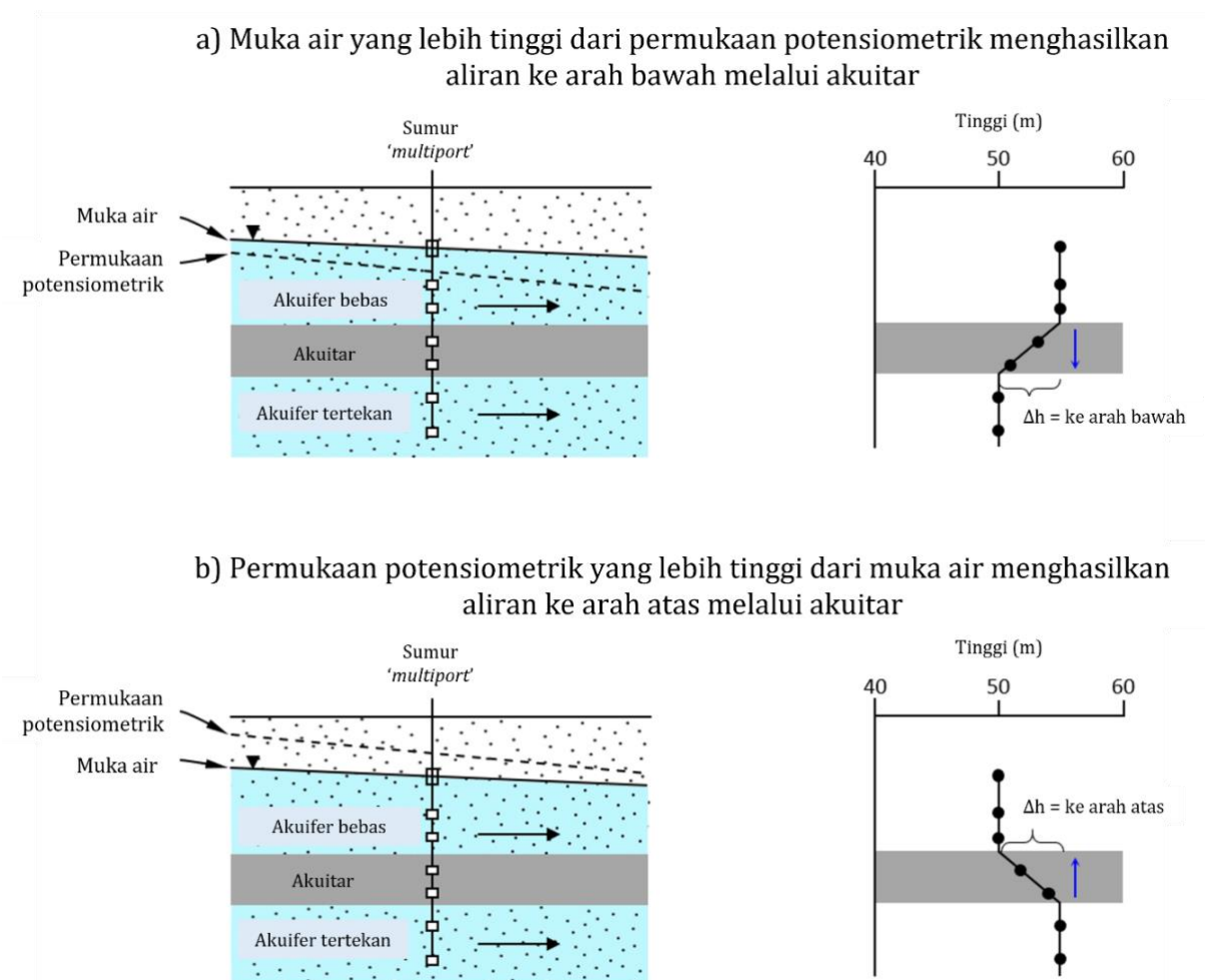
**Gambar 26** - Contoh aliran horizontal dan profil tinggi hidrolik vertikal terkait di: a) akuifer bebas dan b) akuifer tertekan, dan kemiringan vertikal terkait dalam akuitar (Cohen dan Cherry, 2020).

Bagan di sisi kanan Gambar 26b menunjukkan sebagian dari profil kemiringan hidrolik vertikal yang sesuai. Ada perubahan yang jelas pada tinggi hidrolik sepanjang kedalaman akuitar, yang merupakan indikasi dari zona konduktivitas hidrolik yang lebih

rendah. Kemiringan tinggi hidrolik vertikal menunjukkan bahwa, meskipun sebagian besar aliran di akuifer bebas dan tertekan adalah pada arah horizontal, ada sebagian kecil (walaupun relatif kecil) aliran ke arah bawah melalui akuitar (dari tinggi hidrolik lebih tinggi ke tinggi hidrolik lebih rendah). Seperti disebutkan sebelumnya, penting untuk dicatat bahwa kemiringan vertikal tidak selalu berarti bahwa aliran melalui akuitar adalah vertikal. Namun, ini menunjukkan bahwa aliran memiliki komponen arah vertikal.

Jika keberadaan lapisan  $K$  yang lebih rendah (misalnya, akuitar atas) tidak diketahui, tinggi hidrolik yang ditunjukkan pada Gambar 26a dapat ditafsirkan sebagai indikasi aliran ke arah bawah di seluruh zona jenuh, karena tinggi hidrolik lebih tinggi ( $h=55$  m) di zona yang lebih dangkal daripada di zona yang lebih dalam ( $h=50$  m). Ini menunjukkan perlunya memperhitungkan sifat geologis lapisan bawah permukaan tanah, baik yang diketahui atau yang potensial, saat menginterpretasikan data tinggi hidrolik.

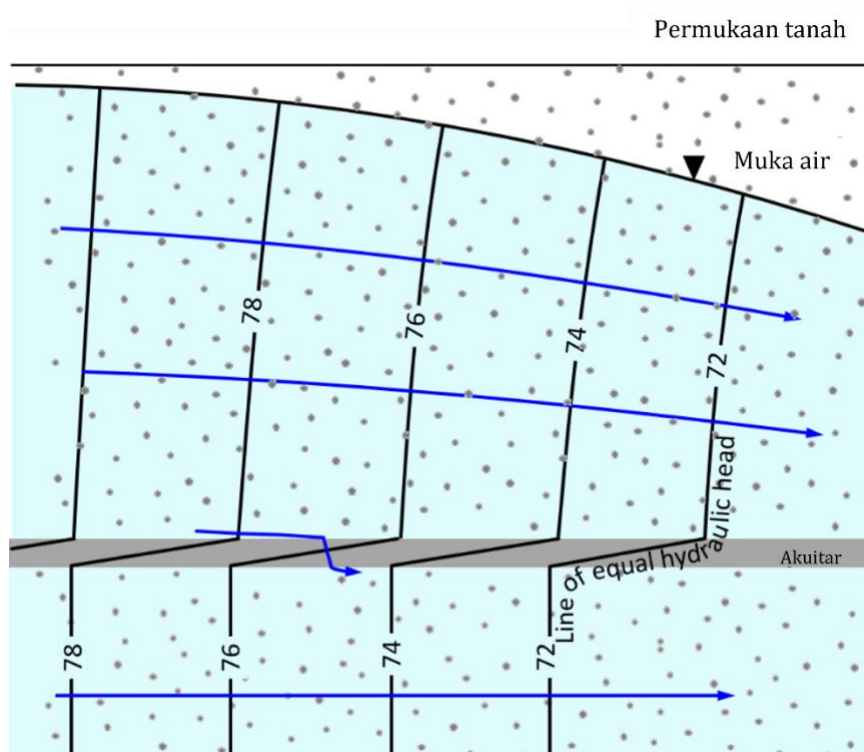
Gambar 27 menunjukkan bahwa arah aliran di akuitar bergantung pada elevasi relatif antara muka air tanah dan permukaan potensiometri.



**Gambar 27** - Profil tinggi hidrolik sepanjang akuitar yang menghasilkan aliran: a) pada arah ke bawah dan b) pada arah ke atas (Cohen dan Cherry, 2020).

Seperti disebutkan sebelumnya, akuitar adalah formasi semi-tembus air yang membatasi aliran antara akuifer di atasnya dan/atau di bawahnya. Akuitar mungkin tersusun dari tanah atau batuan dengan konduktivitas hidrolik yang sangat rendah yang membatasi hampir semua aliran air tanah di antara akuifer. Di sekitar daerah resapan atau pelepasan/pengeluaran air tanah, air tanah di akuifer bebas dan tertekan dapat memiliki komponen aliran vertikal yang signifikan meskipun terdapat akuitar.

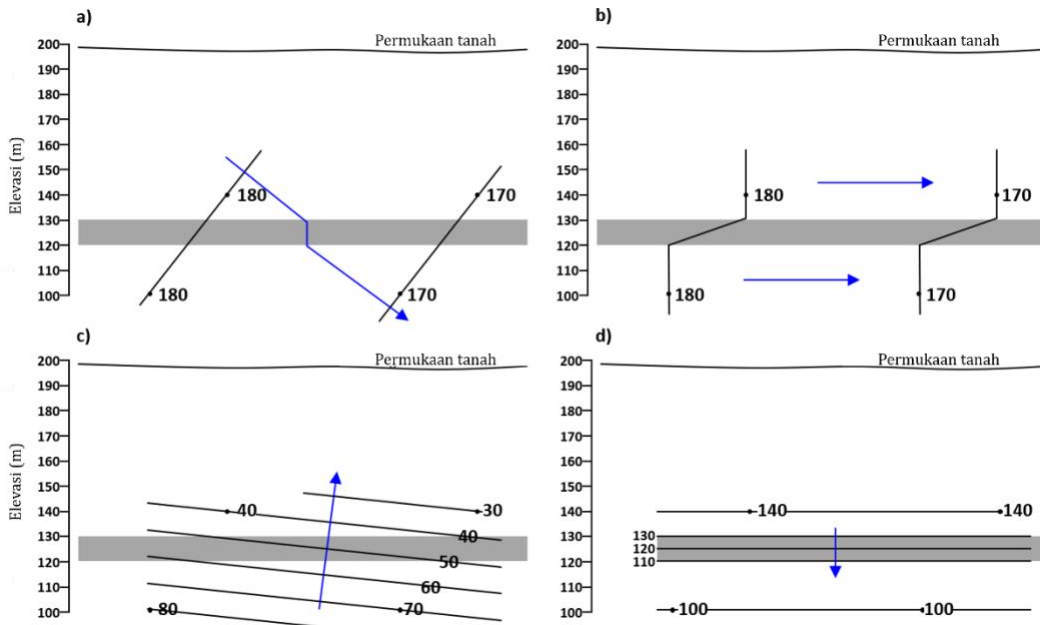
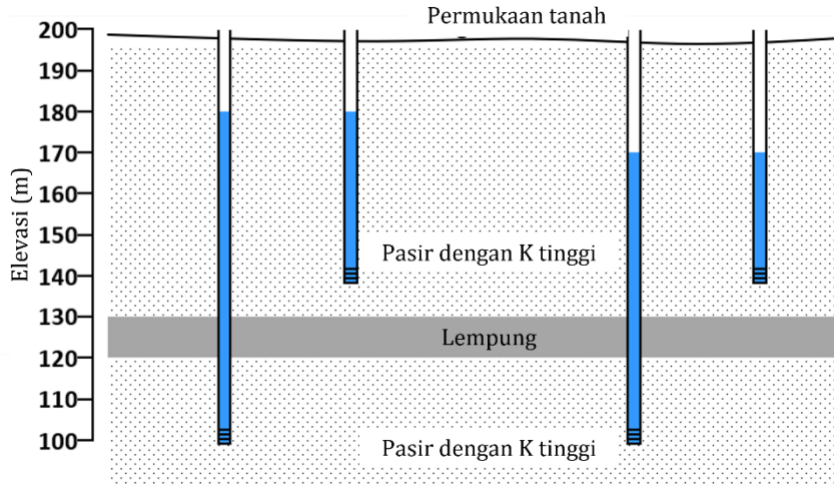
Dalam beberapa kasus, konduktivitas hidrolik dari akuitar kurang ketat, dan beberapa air tanah dapat mengalir antara akuifer di atasnya dan di bawahnya. Formasi seperti itu dapat disebut sebagai *akuitar bocor* (*leaky aquitard*). Dalam kasus tersebut, air tanah terdapat dan memenuhi akuitar sehingga jenuh sepenuhnya, dan oleh karena itu terdapat hubungan secara hidrolik antara akuifer. Dengan demikian, ada kemiringan hidrolik di akuitar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28.



**Gambar 28** - Garis kontur potensiometri dalam akuifer bebas dan tertekan yang dipisahkan oleh akuitar (Cohen dan Cherry, 2020).

### Contoh Soal 10

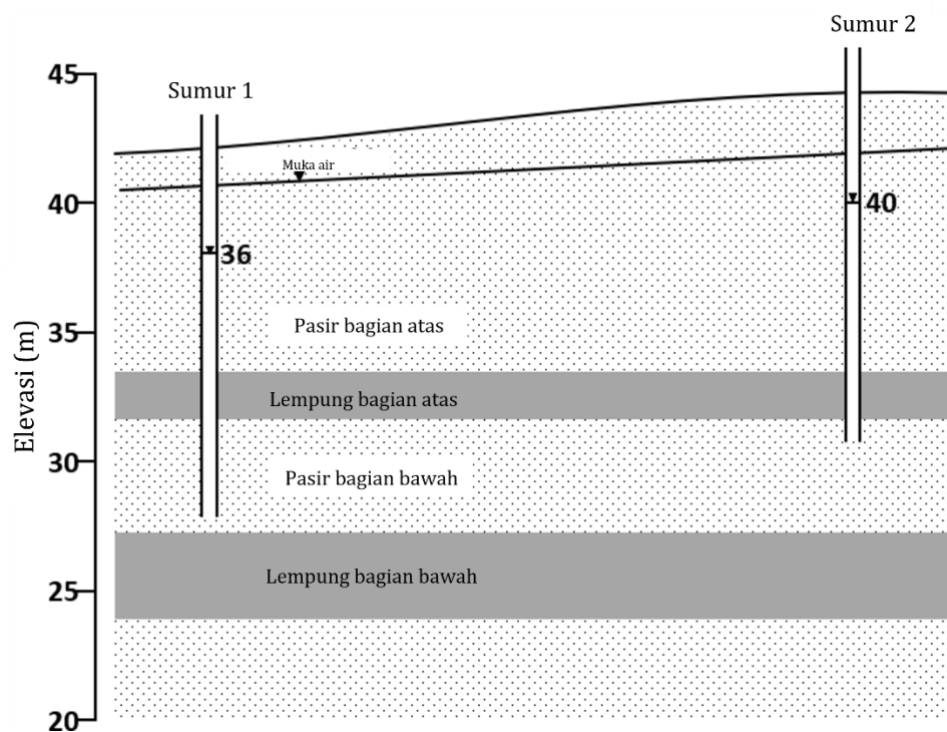
Berdasarkan data elevasi muka air yang ditunjukkan, skema manakah di bawah ini yang paling baik mewakili garis ekuipotensial dan arah aliran?



[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 10](#) ↓

### Contoh Soal 11

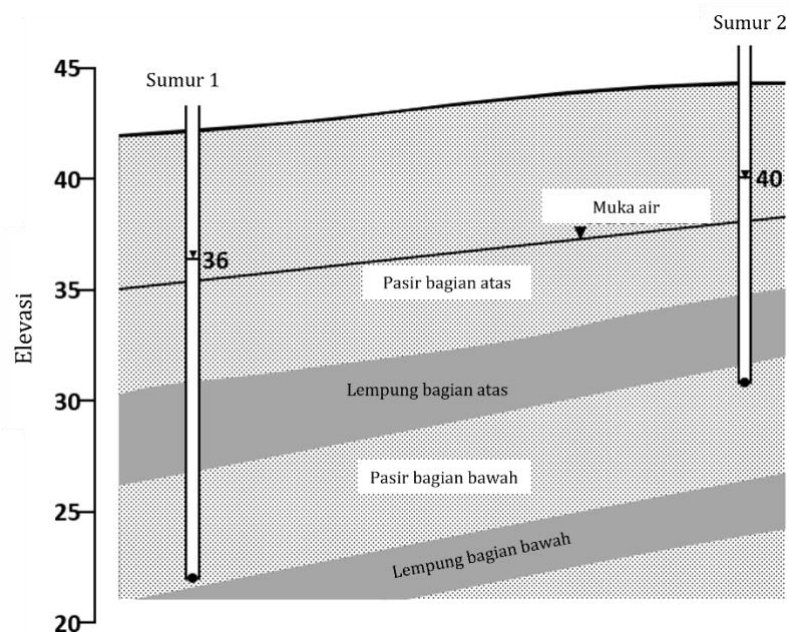
- Gambar kontur potensiometri untuk lapisan pasir bagian bawah dengan interval 1 m.
- Gambarkan permukaan potensiometri.
- Bagaimana arah aliran air tanah yang melalui lapisan lempung bagian atas?
- Buat sketsa perkiraan profil tinggi hidrolik vertikal di sekitar Sumur 2.



[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 11](#) ↴

### Contoh Soal 12

- 1) Gambar kontur potensiometri untuk lapisan pasir bagian bawah dengan interval 1 m.
- 2) Gambarkan permukaan potensiometri.
- 3) Bagaimana arah aliran air tanah yang melalui lapisan lempung bagian atas?
- 4) Buat sketsa perkiraan profil tinggi hidrolik vertikal di sekitar Sumur 2.

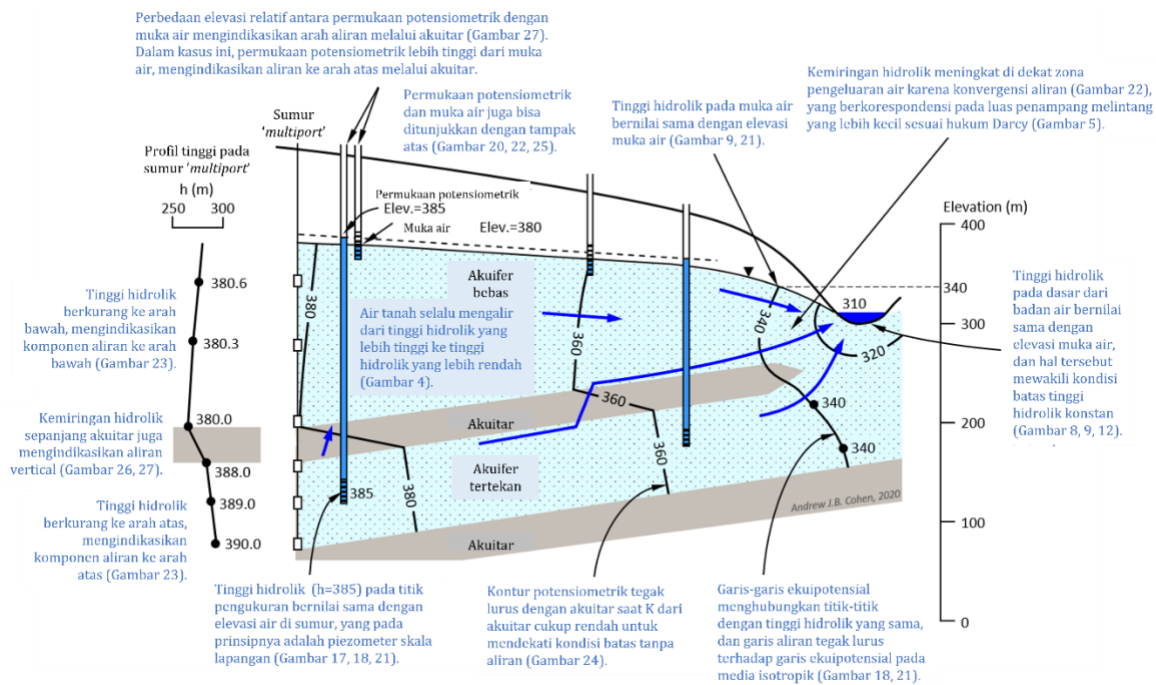


[Klik di sini untuk jawaban Contoh Soal 12](#) ↓



## 6 Rangkuman

Tujuan dari buku ini adalah untuk memperkenalkan konsep paling dasar dan esensial dalam ilmu air tanah. Secara spesifik, dasar-dasar hukum Darcy dalam kondisi langgeng, jenuh, dan isotropik. Konsep tinggi hidrolik, kemiringan hidrolik, kontur potensiometri, dan aliran air pada skala laboratorium yang sebanding dengan aliran dalam akuifer dan akuitar disajikan, bersama dengan representasi konsep-konsep ini pada skala lapangan. Materi disajikan dengan gaya konseptual. Fenomena yang ada dijelaskan dengan detail matematis yang minimal, dan banyak sketsa dengan narasi terkait yang menekankan fitur-fitur dan fenomena yang menjadi kunci. Gambar 29 merangkum beberapa elemen penting yang disajikan dalam buku ini. Referensi pada Gambar yang menyajikan lebih banyak detail ditunjukkan pada Gambar 29. Kegunaan buku ini akan optimal jika buku dibaca secara menyeluruh dari awal sampai akhir dan semua Gambar dipelajari, karena materi disajikan secara iteratif dan banyak mengacu pada Gambar sebelumnya untuk memberikan pemahaman yang lebih dalam pada dasar-dasar dan manifestasinya dalam sistem air tanah.



**Gambar 29** - Rangkuman konsep yang disajikan dalam buku ini (Cohen dan Cherry, 2020).

## 7 Jawaban Contoh Soal

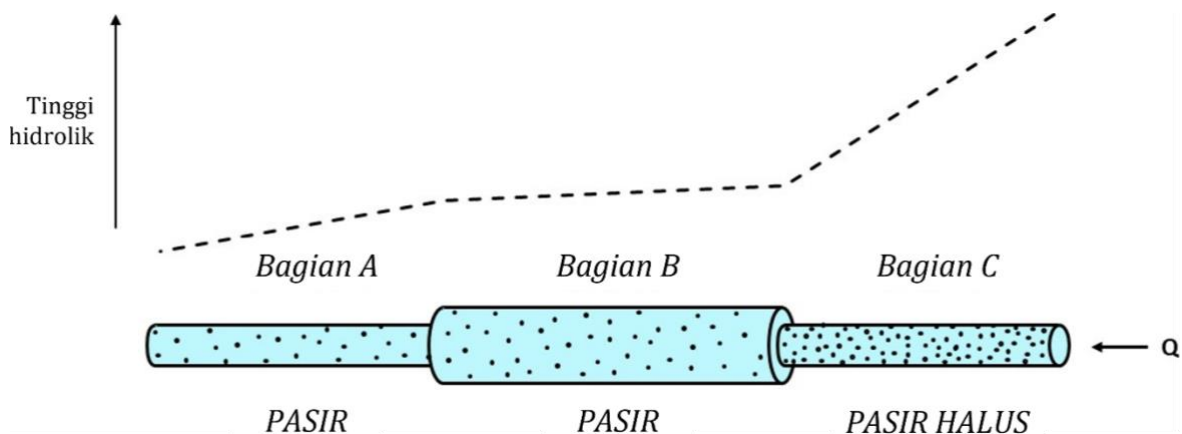
### Jawaban Contoh Soal 1

**Pertanyaan:** Buat sketsa kemiringan tinggi hidrolik arah horizontal sepanjang alat yang ditunjukkan di bawah ini.

Sketch the hydraulic head gradient along the length of the cylinders below.

**Jawaban:**

- Arah aliran adalah dari kanan ke kiri. Maka dari itu, tinggi hidrolik berkurang ke arah kiri.
- Kemiringan hidrolik lebih curam di Bagian A dibanding di Bagian B, karena luas penampang melintang di Bagian A lebih kecil daripada di Bagian B, di saat kedua bagian memiliki nilai K yang sama.
- Kemiringan hidrolik di Bagian C lebih curam dibanding di Bagian A, karena K di Bagian C lebih kecil daripada di Bagian A, di saat kedua bagian memiliki luas yang sama.
- Kemiringan hidrolik di Bagian C merupakan yang paling curam, karena bagian tersebut memiliki nilai K yang paling rendah, juga memiliki luas penampang melintang yang kecil.



[Kembali ke Contoh Soal 1](#) ↗

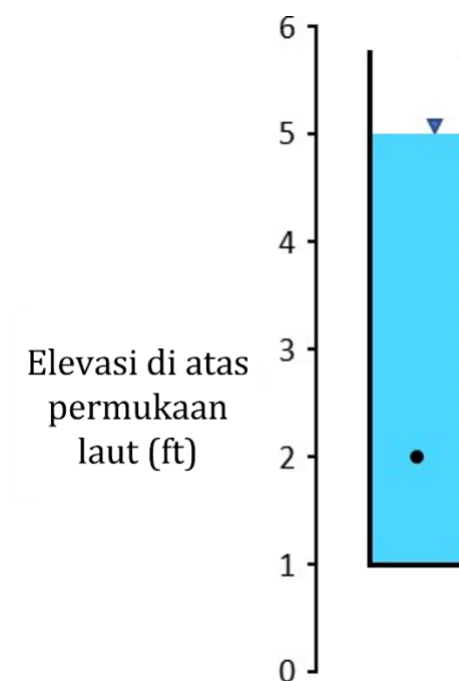


## Jawaban Contoh Soal 2

**Pertanyaan:** Berapa tinggi hidrolik pada titik di kolom yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini?

- a) 1 ft
- b) 2 ft
- c) 3 ft
- d) 4 ft
- e) 5 ft

**Jawaban:** Jawaban yang benar adalah 5 ft, karena tinggi hidrolik di mana-mana di kolom air statis sama dengan elevasi muka air. Tinggi hidrolik tidak bernilai 1 ft, karena tinggi hidrolik tidak sama dengan tinggi dari dasar kolom air. Tinggi hidrolik tidak bernilai 2 ft, karena tinggi hidrolik di kolom air tidak sama dengan elevasi titik pengukuran. Tinggi hidrolik tidak bernilai 3 ft, karena tinggi hidrolik tidak sama dengan tinggi kolom air di atas titik pengukuran. Tinggi hidrolik tidak bernilai 4 ft, karena tinggi hidrolik tidak mewakili tinggi total kolom air di atas titik pengukuran.



[Kembali ke Contoh Soal 2](#) ↑

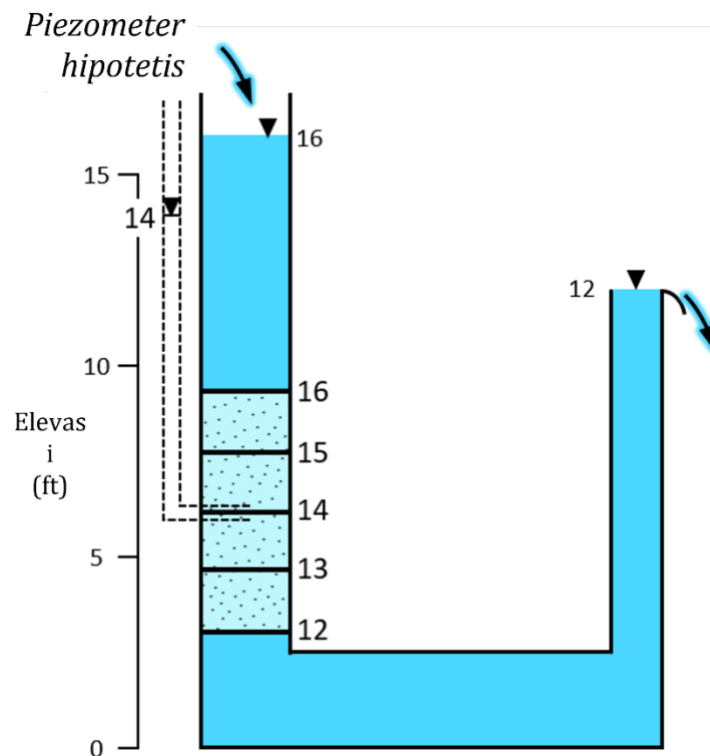
### Jawaban Contoh Soal 3

#### Pertanyaan:

- Gambar garis ekuipotensial dalam pasir dengan interval 1 ft.
- Hingga elevasi berapakah air di dalam piezometer dalam soal akan naik?

#### Jawaban:

- Nilai konstan tinggi hidrolik pada bagian atas dan bawah kolom pasir sama dengan elevasi muka air pada kolom air yang menjadi kondisi batas masing-masing ujung media berpori. Arah aliran vertikal dalam kolom pasir mempertimbangkan geometri silinder, dan garis potensiometrik ada pada arah horizontal (kontur potensiometrik tegak lurus terhadap arah aliran dan tegak lurus terhadap kondisi batas tanpa aliran). Kemiringan hidrolik ditentukan oleh jarak antara garis kontur; dalam hal ini, jaraknya harus sama karena mediumnya homogen.
- Tinggi air dalam piezometer sama dengan tinggi hidrolik pada titik pengukuran, yang dalam hal ini adalah ujung terbuka piezometer di pasir. Oleh karena itu, tinggi air di piezometer hipotetis adalah 14 ft.



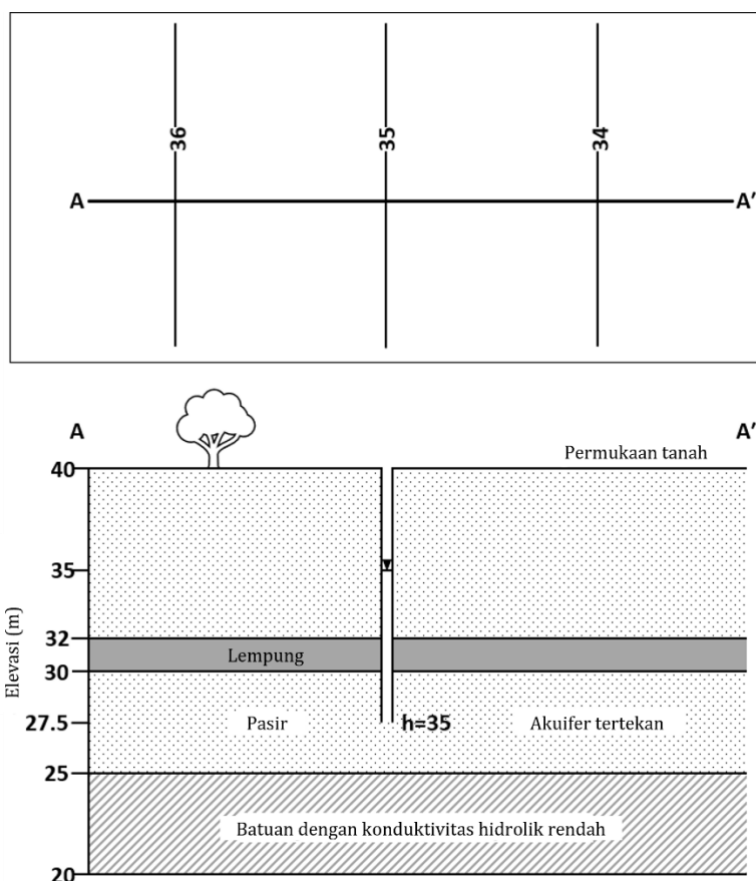
[Kembali ke Contoh Soal 3](#) ↑

### Jawaban Contoh Soal 4

**Pertanyaan:** Gambar-gambar di bawah ini menunjukkan peta kontur potensiometri dari akuifer tertekan dan penampang melintang sepanjang garis A-A'. Berapa kedalaman permukaan air di sumur (relatif terhadap permukaan tanah)? Jelaskan.

- a) 3 m
- b) 5 m
- c) 7.5 m
- d) 10 m

**Jawaban:** Jawaban yang benar adalah 5 m, karena tinggi hidrolik pada posisi sumur adalah 35 m (ditunjukkan oleh peta kontur potensiometri). Karena elevasi muka air di dalam sumur sama dengan tinggi hidrolik, maka elevasi muka air di dalam sumur harus 35 m. Karena elevasi muka air tanah adalah 40 m, kedalaman air adalah 5 m ( $40-35$ ).

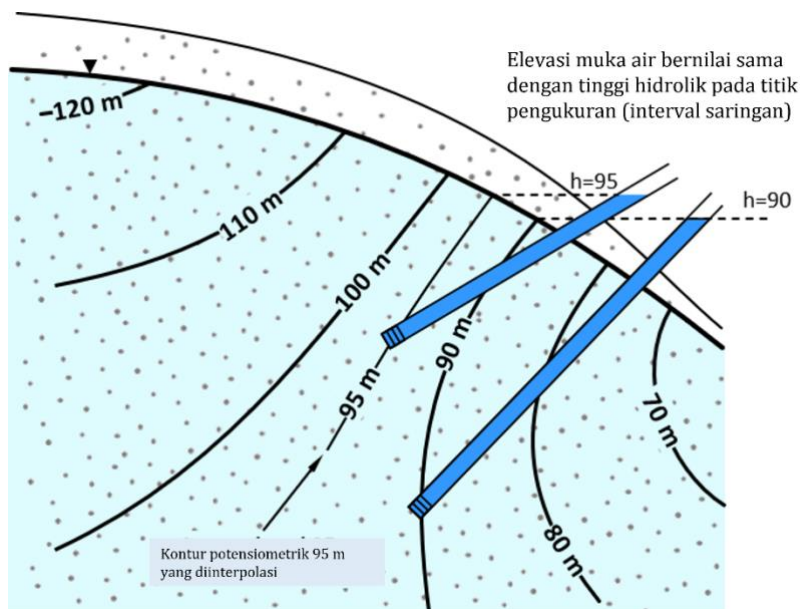


[Kembali ke Contoh Soal 4 ↑](#)

### Jawaban Contoh Soal 5

**Pertanyaan:** Hingga elevasi berapakah air di dalam sumur miring akan naik?

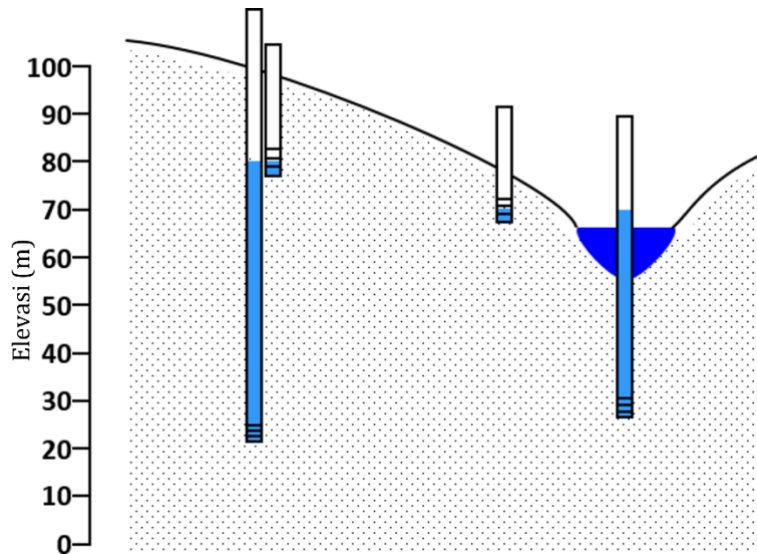
**Jawaban:** Elevasi muka air di dalam sumur sama dengan tinggi hidrolik pada titik pengukuran (interval saringan), yang ditunjukkan oleh garis kontur potensiometri. Orientasi piezometer tidak berpengaruh.



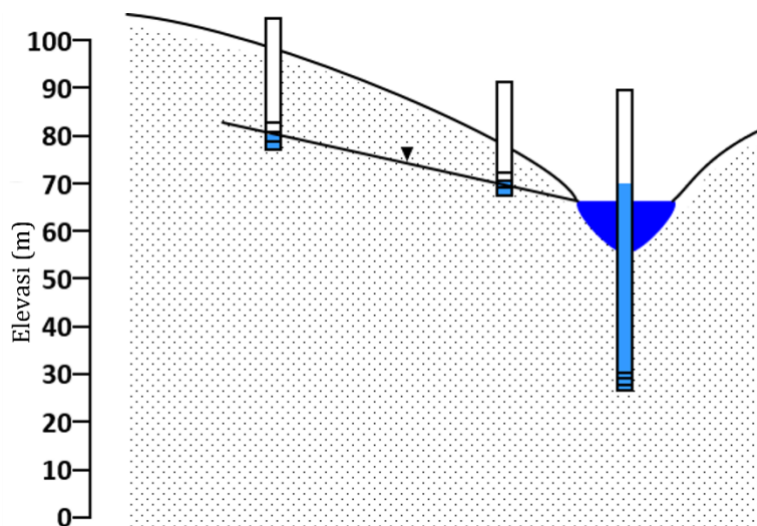
[Kembali ke Contoh Soal 5](#) ↑

## Jawaban Contoh Soal 6

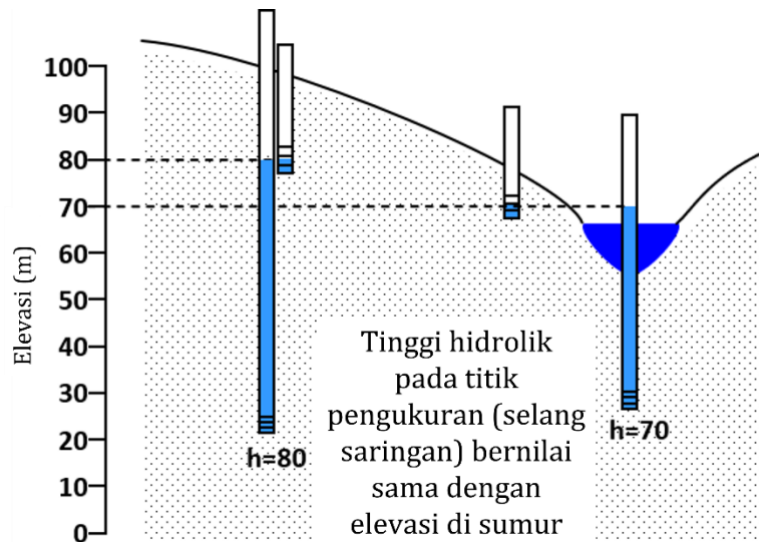
**Instruksi:** Gambar muka air dan gambar kontur ekuipotensial 80 m and 70 m. Perkirakan arah aliran.



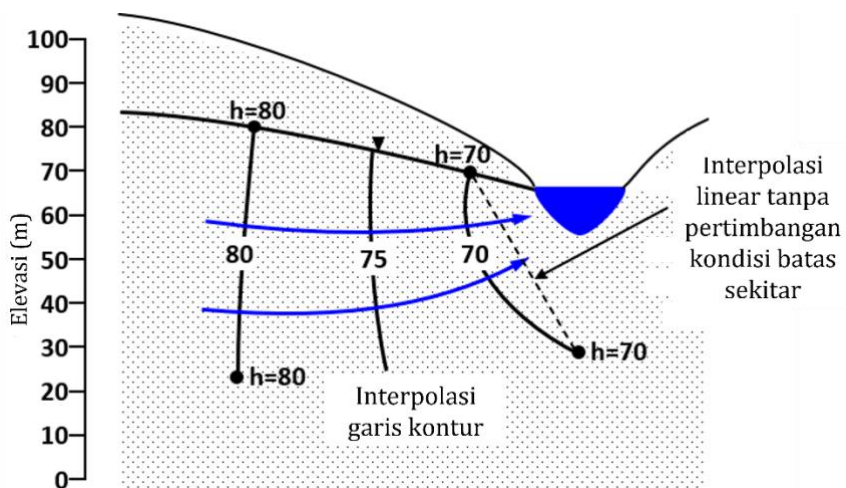
**Jawaban Langkah 1:** Ketahui bahwa elevasi muka air di sumur dangkal terhubung dengan saringan. Oleh karena itu, elevasi muka air ini menentukan muka air dari akuifer bebas. Dengan demikian, muka air dapat diinterpolasi berdasarkan data ini dan juga mempertimbangkan elevasi muka air dari badan air terdekat.



**Jawaban Langkah 2:** Tentukan tinggi hidrolik di setiap lokasi pengukuran, yang mencakup elevasi muka air dan elevasi muka air di sumur yang dipasang saringan; tinggi hidrolik didasarkan pada titik pengukuran (elevasi saringan) dan elevasi muka air yang sesuai.



**Jawaban Langkah 3:** Dengan menggunakan distribusi tinggi hidrolik yang dihasilkan, hubungkan titik-titik tinggi hidrolik yang sama dan/atau perkirakan lokasi kontur ekuipotensial dengan menginterpolasi nilai tinggi hidrolik. Selanjutnya, perkirakan geometri aliran berdasarkan fitur lokasi studi. Dalam hal ini, kita memperkirakan aliran yang konvergen menuju badan air di permukaan, sehingga garis ekuipotensial lebih melengkung, bukan garis lurus. Gambar garis aliran tegak lurus terhadap garis ekuipotensial.



[Kembali ke Contoh Soal 6 ↑](#)

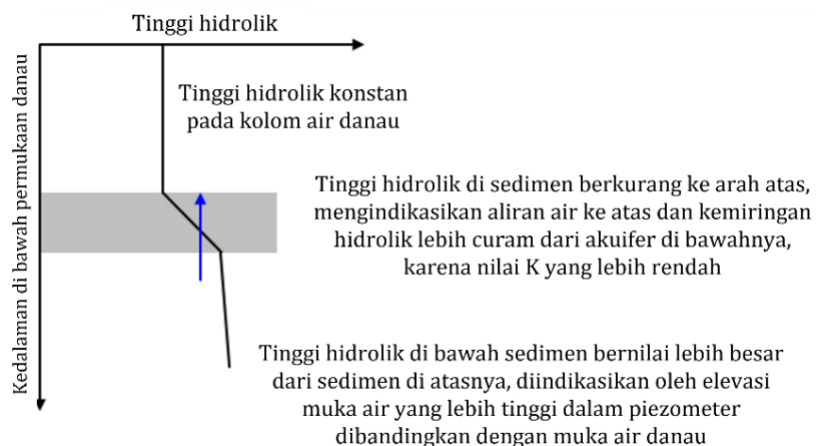
## Jawaban Contoh Soal 7

### Pertanyaan:

- Sebuah piezometer dimasukkan ke dalam akuifer di bawah sedimen (K rendah) sebuah danau, dan air naik ke elevasi yang stabil seperti yang ditunjukkan di bawah ini. Muka air yang ada tidak ditampilkan. Apakah air mengalir ke atas atau ke bawah melalui sedimen? Jelaskan.
- Gambar representasi skematis dari profil tinggi hidrolik vertikal, memanjang dari permukaan air danau ke saringan sumur.

**Jawaban a)** Tinggi hidrolik pada titik pengukuran (elevasi saringan) di piezometer sama dengan elevasi muka air di piezometer. Tinggi hidrolik di semua titik kedalaman air di danau sama dengan ketinggian permukaan danau. Oleh karena itu, tinggi hidrolik di bawah sedimen lebih tinggi daripada di atas sedimen, sehingga aliran bergerak ke atas melalui sedimen, karena air bergerak dari tinggi hidrolik yang lebih tinggi ke tinggi hidrolik yang lebih rendah.

**Jawaban b)** Profil tinggi hidrolik vertikal menunjukkan tinggi hidrolik konstan di danau dan kemiringan hidrolik ke arah atas dalam sedimen. Kemiringan tinggi hidrolik juga memiliki komponen ke arah atas di akuifer, tetapi konduktivitas hidroliknya lebih tinggi, sehingga kemiringannya tidak terlalu besar (tidak lebih curam).



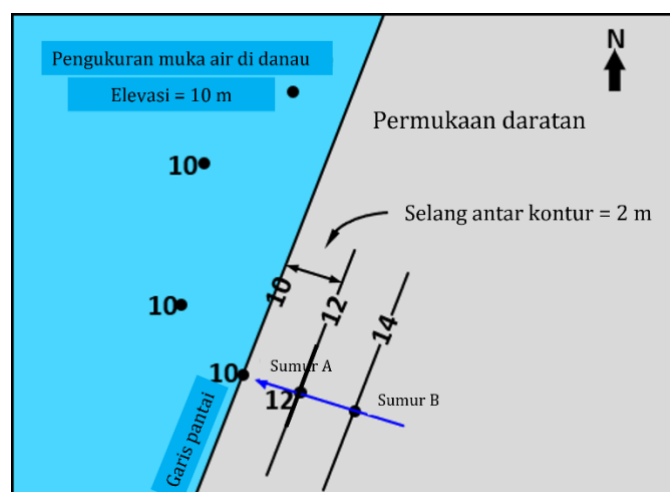
[Kembali ke Contoh Soal 7](#) ↑

### Jawaban Contoh Soal 8

**Pertanyaan:** Gambar di bawah ini adalah tampilan peta danau dan garis pantai. Elevasi muka air di Sumur A adalah 12 m. Asumsikan muka air tanah planar (bidang miring), berapa perkiraan elevasi muka air di Sumur B?

- a) 12
- b) 13
- c) 14
- d) Sebuah nilai antara 12 dan 13

**Jawaban:** Elevasi muka air di danau horizontal. Oleh karena itu, tinggi hidroliknya sama di mana-mana di danau, termasuk di sepanjang garis danau-pantai. Karena arah aliran adalah ortogonal terhadap garis ekuipotensial dan muka air tanah dianggap datar, interval kontur 2 m diekstrapolasi sebagai kenaikan elevasi, sehingga menghasilkan elevasi muka air 14 m di Sumur B.



[Kembali ke Contoh Soal 8](#) ↑



### Jawaban Contoh Soal 9

**Pertanyaan:** Perkirakan elevasi muka air di masing-masing sumur dan tentukan apakah terdapat aliran secara vertikal melalui lapisan akuitar lempung.

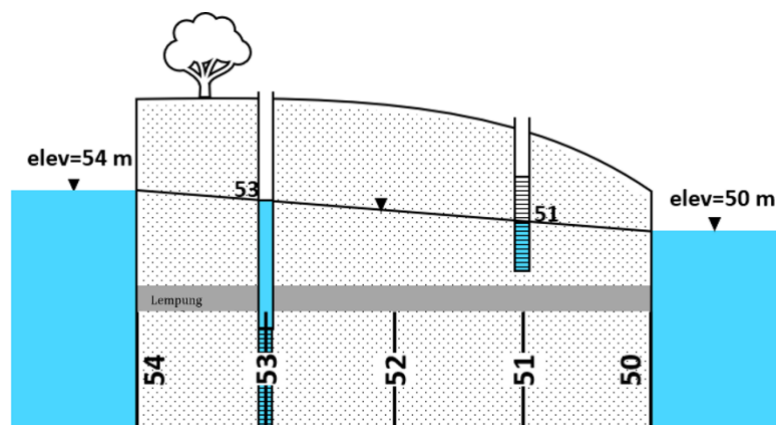
**Jawaban:**

**Langkah 1:** Sebagai perkiraan dan penyederhanaan, asumsikan elevasi muka air adalah linier. Dengan interpolasi linier, elevasi muka air di tengah adalah 52 m. Sumur di sebelah kanan jaraknya setengah dari sisi kanan ke tengah, jadi tinggi airnya 51 m. Begitu pula elevasi muka air di lokasi sumur sebelah kiri adalah 53 m

**Langkah 2:** Akuifer tertekan horizontal di bawah lapisan lempung dibatasi di kedua sisinya oleh kondisi batas tinggi hidrolik konstan, yang nilainya sesuai dengan elevasi muka air di masing-masing badan air (lihat Gambar 12 dan 17 untuk skenario yang sebanding). Arah aliran adalah horizontal berdasarkan geometri dari akuifer tertekan dan posisi dari kondisi batas (di kedua ujungnya).

**Langkah 3:** Media aliran bersifat homogen, sehingga kemiringannya konstan, artinya jarak antar garis ekuipotensialnya konstan. Jarak antara garis dan nilainya ditentukan menggunakan interpolasi linier.

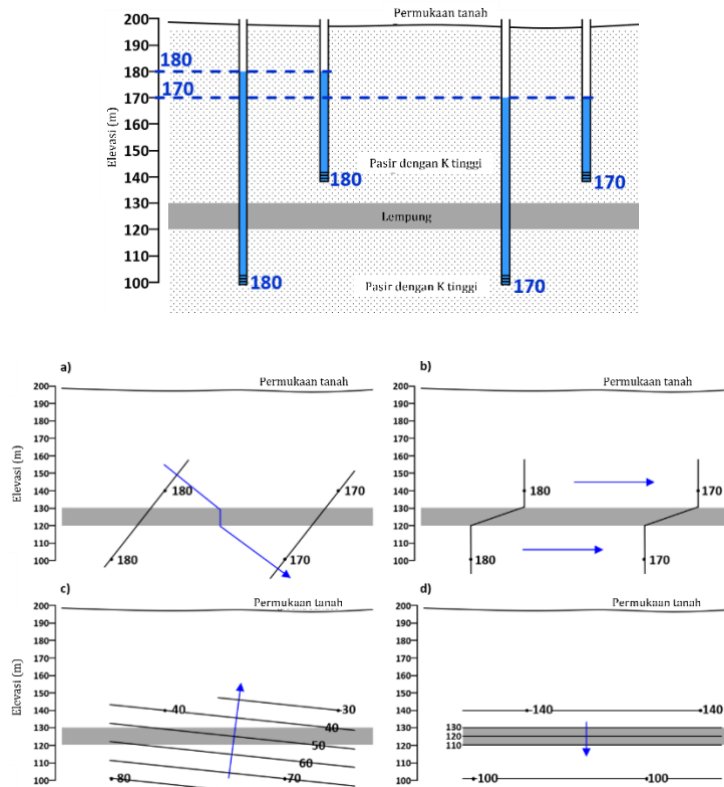
**Langkah 4:** Sumur di sisi kiri dipasang saringan di kedalaman lapisan akuifer tertekan di mana tinggi hidroliknya adalah 53 m (seperti yang ditunjukkan oleh garis ekuipotensial). Di lokasi yang sama, elevasi muka air juga 53 m. Kita menyederhanakan dengan mengasumsikan penurunan muka air tanah secara linier meskipun kita tahu akan ada kemiringan yang lebih curam di sisi kanan yang disebabkan oleh penurunan luas penampang yang tegak lurus arah aliran (seperti yang diilustrasikan pada Gambar 22). Karena kita mengasumsikan kemiringan linier baik di akuifer tertekan dan akuifer bebas, tinggi hidrolik di setiap lokasi akan sama di atas dan di bawah lapisan lempung. Akibatnya, tidak ada kemiringan tinggi hidrolik secara vertikal sehingga tidak ada aliran vertikal melintasi lempung.



[Kembali ke Contoh Soal 9](#) ↗

## Jawaban Contoh Soal 10

**Pertanyaan:** Berdasarkan data elevasi muka air yang ditunjukkan, skema manakah di bawah ini yang paling baik mewakili garis ekuipotensial dan arah aliran?



**Jawaban:** Jawaban yang benar adalah pilihan “b”: Tinggi hidrolik pada setiap interval saringan sama dengan elevasi muka air di setiap sumur. Berdasarkan data tinggi hidrolik di zona pasir, tinggi hidrolik menurun ke arah kanan, dan aliran vertikal akan dibatasi karena akuitar. Dengan demikian, aliran di zona pasir sebagian besar horizontal, dan kontur potensiometrik hampir vertikal karena aliran ortogonal terhadap kontur potensiometrik dalam media isotropik.

Pilihan “a” BUKAN jawaban yang benar. Nilai tinggi hidrolik yang diplot pada setiap titik sudah benar karena merupakan elevasi muka air di dalam sumur. Namun, ini bukan jawaban yang benar, karena garis ekuipotensial tidak memiliki infleksi di bagian atas dan bawah zona dengan nilai K rendah (lihat Gambar 28).

Pilihan “c” TIDAK BISA menjadi jawaban yang benar, karena nilai tinggi hidrolik yang diplot pada titik pengukuran tidak mewakili tinggi hidrolik. Sebaliknya, mereka mewakili ketinggian kolom air di masing-masing sumur.

Pilihan “d” TIDAK BISA menjadi jawaban yang benar, karena nilai yang diplot pada titik pengukuran tidak mewakili tinggi hidrolik; sebaliknya, mereka adalah tinggi elevasi dari titik pengukuran.

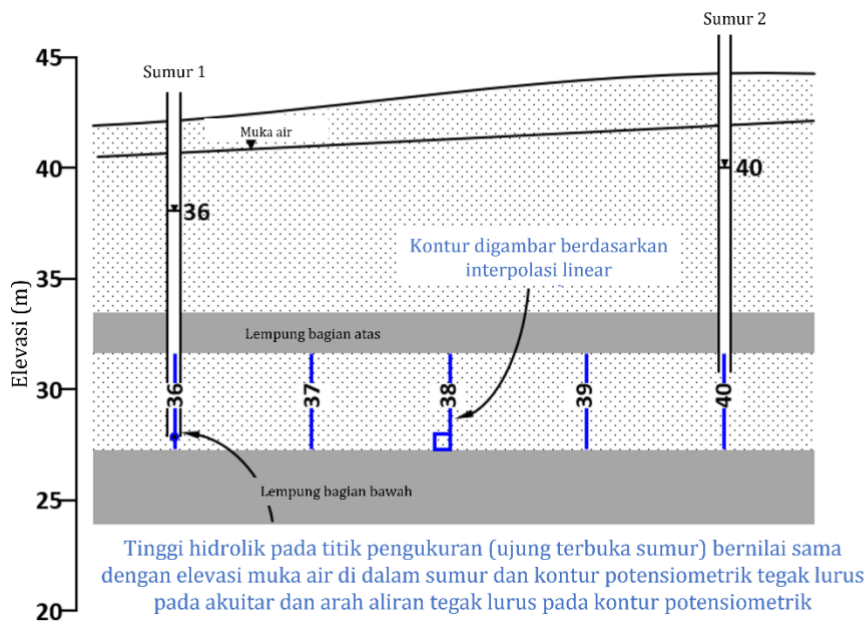
[Kembali ke Contoh Soal 10](#) ↑

### Jawaban Contoh Soal 11

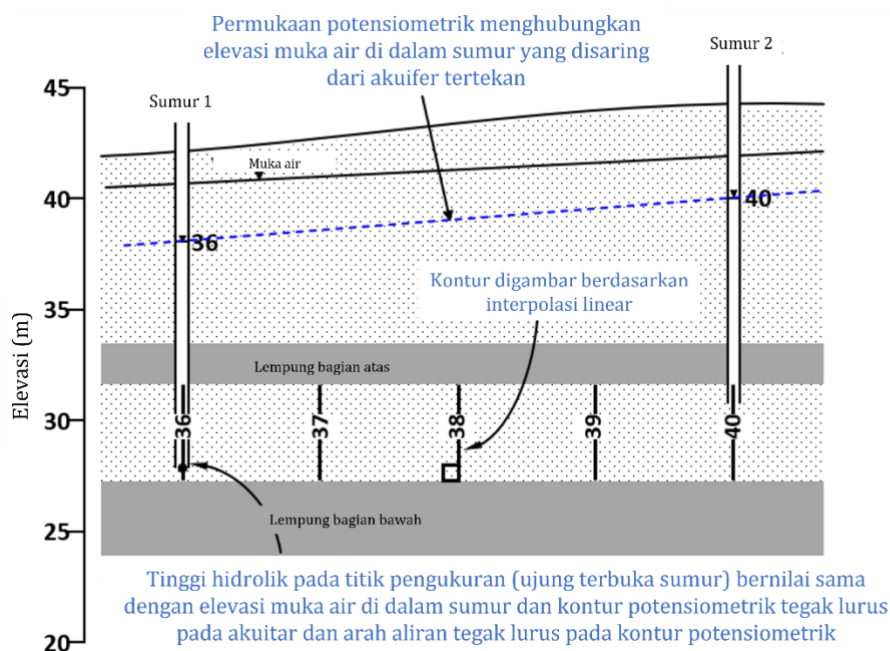
#### Instruksi/pertanyaan:

- Gambar kontur potensiometri untuk lapisan pasir bagian bawah dengan interval 1 m.
- Gambarkan permukaan potensiometri untuk lapisan pasir bagian bawah.
- Bagaimana arah aliran air tanah yang melalui lapisan lempung bagian atas? dan
- Buat sketsa perkiraan profil tinggi hidrolik vertikal di sekitar Sumur 2.

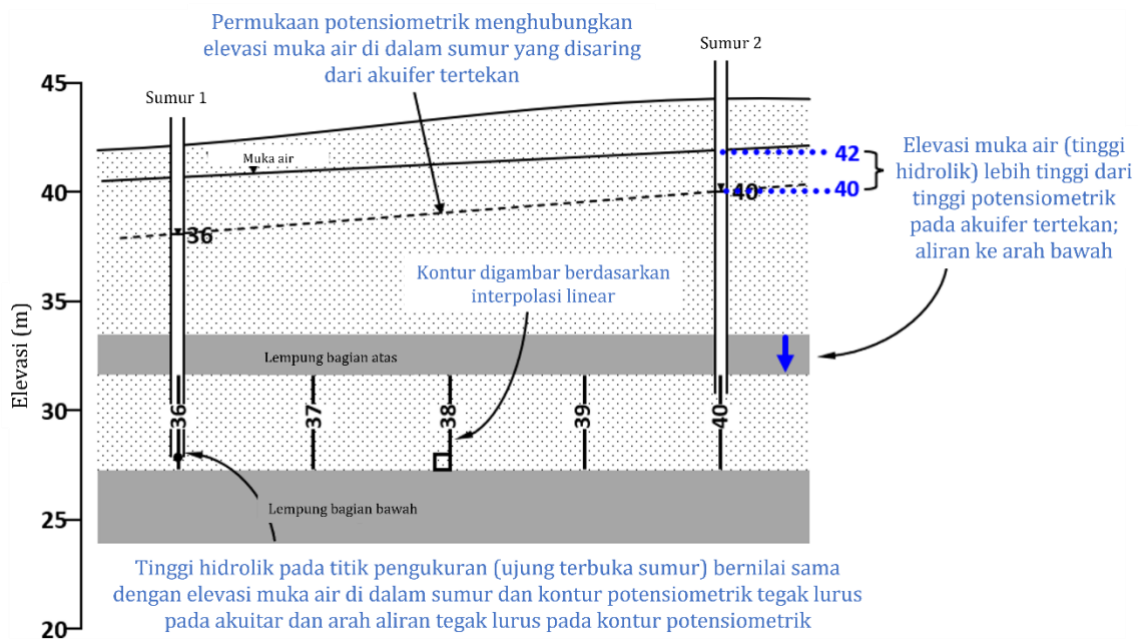
#### Jawaban 11a)



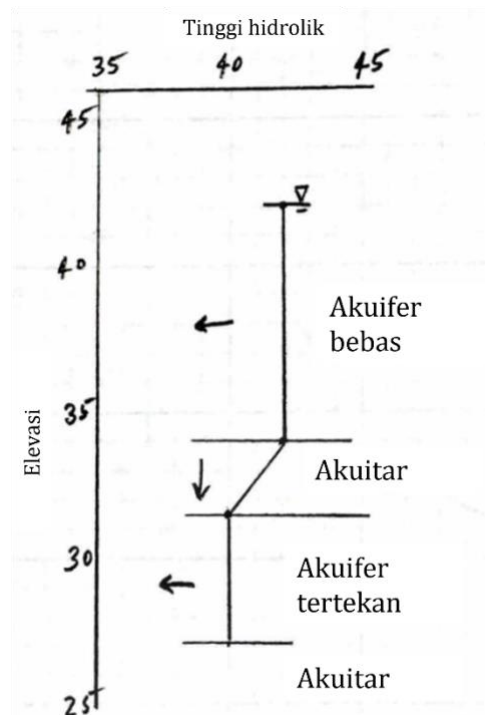
#### Jawaban 11b)



Jawaban 11c)



Jawaban 11d)



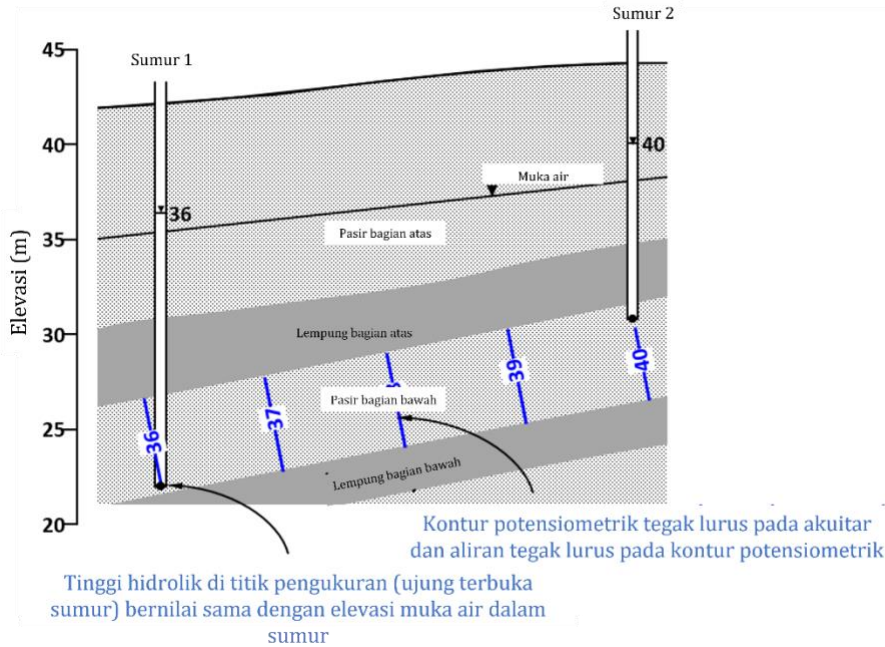
[Kembali ke Contoh Soal 11](#)

### Jawaban Contoh Soal 12

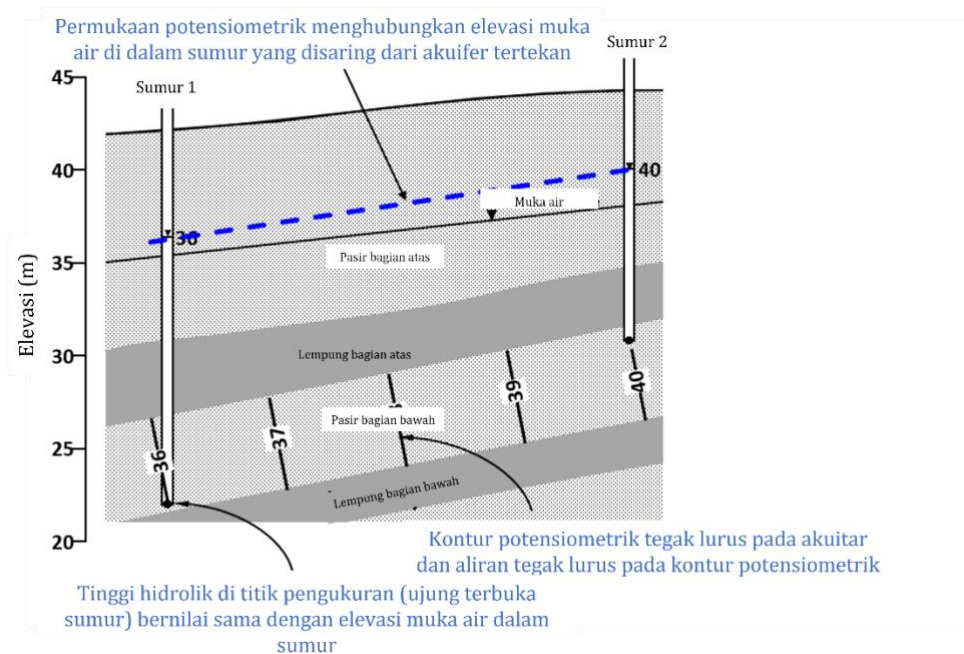
#### Instruksi/pertanyaan:

- Gambar kontur potensiometri untuk lapisan pasir bagian bawah dengan interval 1 m.
- Gambarkan permukaan potensiometri untuk lapisan pasir bagian bawah.
- Bagaimana arah aliran air tanah yang melalui lapisan lempung bagian atas? dan
- Buat sketsa perkiraan profil tinggi hidrolik vertikal di sekitar Sumur 2.

#### Jawaban 12a)

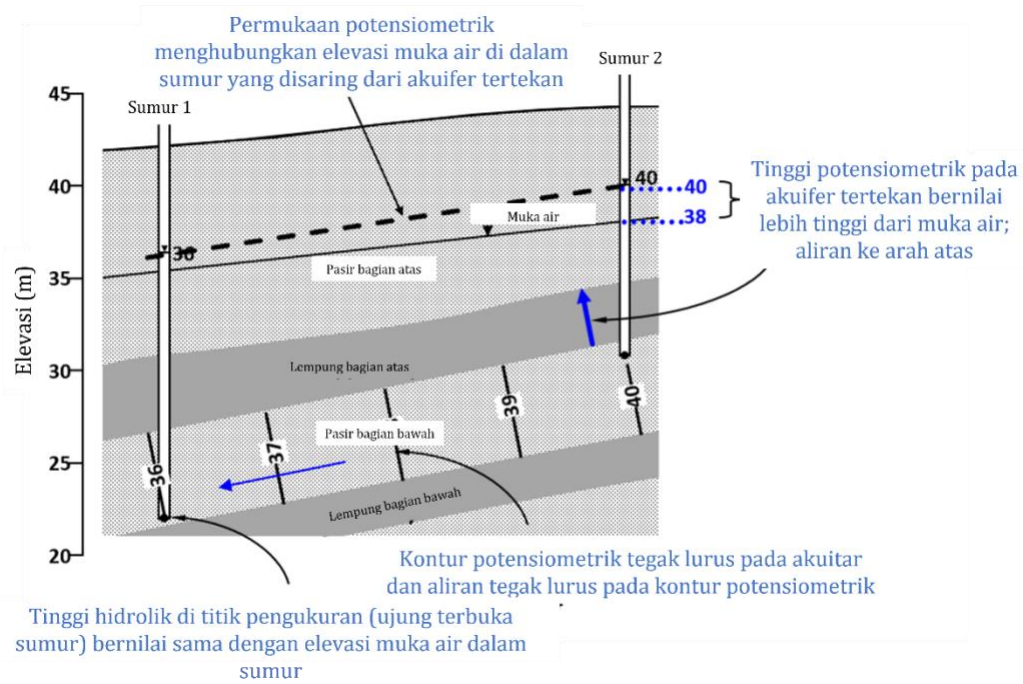


#### Jawaban 12b)

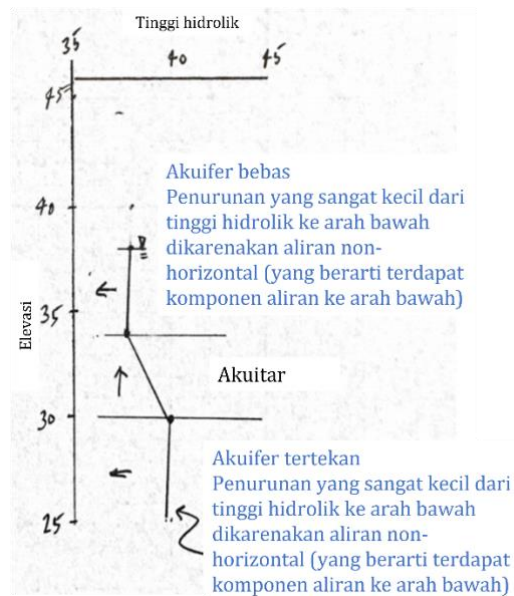




**Jawaban 12c)**



**Jawaban 12d)**



[Kembali ke Contoh Soal 12](#) ↴

## 8 Daftar Pustaka

Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon [The Public Fountains of the City of Dijon]. Dalmont, Paris.

Woessner, William W., and Eileen P. Poeter, 2020, Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow. The Groundwater Project. <https://gw-project.org/books/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/>.

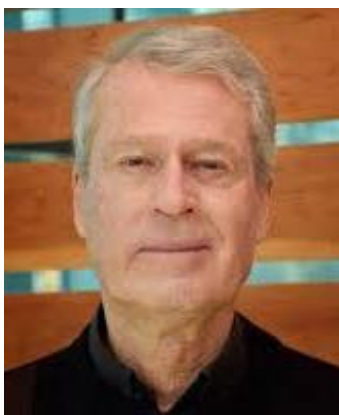
Poeter, E., and P. Hsieh, 2020, Groundwater Flow Nets. The Groundwater Project. <https://gw-project.org/books/graphical-construction-of-groundwater-flow-nets/>.



## 9 Tentang penulis



**Dr. Andrew Cohen** mendapatkan gelar Ph.D.nya dalam bidang *Civil and Environmental Engineering* dari *University of California* di Berkeley and Sarjana Sains di bidang Sumber Daya Air dari *Department of Earth Sciences, State University of New York* di Oneonta. Fokusnya adalah karakterisasi hidrogeologi dari lokasi terkontaminasi dan pemodelan terkait dari pergerakan dan nasib kontaminan di tanah, air tanah, air permukaan, dan sedimen. Sebelum perannya saat ini sebagai ahli hidrogeologi kontaminan di industri konsultasi lingkungan, dia adalah seorang *Research Associate* di Laboratorium Nasional Lawrence Berkeley, di mana dia fokus pada karakterisasi dan pemodelan air tanah di batuan dasar yang retak dan patah. Dia adalah seorang *Adjunct Professor* di *New Jersey Institute of Technology*, tempat dia mengajar *Contaminant Hydrogeology*.



**Dr. John Cherry**, setelah menyelesaikan studinya di Amerika Serikat dan post-doc di Prancis, bergabung dengan *University of Waterloo* pada tahun 1971 untuk penelitian lapangan tentang migrasi dan nasib kontaminan dalam air tanah dan remediasinya. Dia ikut menulis "Groundwater" dengan R.A. Freeze (1979) dan ikut menyunting/menulis bersama beberapa bab dalam buku "*Dense Chlorinated Solvents...in Groundwater*" (1996). Dia adalah Direktur pendiri Konsorsium Universitas untuk Penelitian Pencemaran Air Tanah yang Berfokus di Lapangan. Di Pusat Penelitian Air Tanah G360, Universitas Guelph, dia berpartisipasi dalam penelitian tentang teknologi pemantauan air tanah dan membuat sumur yang aman bagi masyarakat pedesaan di daerah terpencil. Dia adalah Ketua Panel Pakar Kanada tentang Dampak Lingkungan pengembangan serpihan gas (*Shale Gas*) (2012-2014). Dia adalah Anggota Asing dari Akademi Teknik AS. Dia menerima *Lee Kwan Yew Water Prize* pada tahun 2016, dan *Stockholm Water Prize*, 2020.

## 10 Tentang penerjemah



Steven Reinaldo Rusli adalah seorang dosen di Universitas Katolik Parahyangan, Indonesia. Setelah menempuh studi sarjananya di Jurusan Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan, kariernya dimulai pada bidang konsultasi perencanaan teknik sipil, sebelum fokus ke bidang teknik sumber daya air. Dia menyelesaikan studi magisternya pada program kerjasama antara Universitas Katolik Parahyangan dan *Hohai University* di Nanjing, Tiongkok, dengan topik penelitian ketidakpastian parameter model hidrologi untuk pemodelan keseimbangan air (*water balance*) pada berbagai variasi skala temporal. Pada waktu penerjemahan buku ini, Steven berada pada tahap akhir penyelesaian studi doktoralnya di *Wageningen University & Research*, dengan fokus penelitian pemodelan numerik perilaku aliran air tanah antar akuifer pada berbagai kondisi yang dipengaruhi variasi faktor iklim dan manusia. Selain fokus meneliti, penerjemah juga aktif melakukan pengajaran, memberikan seminar, pelatihan, dan menjadi narasumber di berbagai instansi dan bidang ilmu terkait, terutama hidrologi.

Harap pertimbangkan untuk mendaftar ke milis GW-Project untuk tetap mendapatkan informasi tentang rilis buku baru, acara, dan cara untuk berpartisipasi dalam GW-Project. Saat Anda mendaftar ke daftar surel kami, hal tersebut membantu kami membangun komunitas air tanah global. [Daftar di sini](#)↗.

