

Mérési módszer a hidrogén porózus formációkban történő tárolhatóságának vizsgálatára

Dócs Roland* , Vadászi Marianna , Szunyog István 

Miskolci Egyetem, Miskolc, Magyarország

*Levelező szerző, e-mail: roland.docs@uni-miskolc.hu

Beérkezett: 2023. november 16.; elfogadva: 2024. január 3.; Online megjelent: 2024. március 28.

Összefoglalás

A Nemzeti Hidrogénstratégia kiemelt célja a villamosenergia- és földgáz-infrastruktúra együttműködésével a szezonális áramtárolási képesség megvalósítása. A villamos energia ilyen mértékű tárolása csak fizikai formában (gázmolekula) föld alatti tárolókban lehetséges. A Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium projekt keretében egy egyedi tervezésű és építésű kőzetvizsgáló berendezés segítségével a hidrogénnel kevert földgáz föld alatti formációkban történő elhelyezhetőségét vizsgálja. A már kiforrott API RP 40 szabványban leírt metodikát követve az eszköz újszerűsége abban rejlik, hogy a hidrogén helyett egy kontrollgáz segítségével határozzuk meg a kőzet kiinduló és megváltozott paramétereit. A cikkben bemutatásra kerül a mérési módszer szakirodalmi előzménye és maga a módosított eljárás.

Kulcsszavak: üvegházhatás, földgáz, hidrogén, tárolás, föld alatti

Measurement method for hydrogen storability determination in porous rock formations

Roland Dócs, Marianna Vadászi, István Szunyog

University of Miskolc, Miskolc, Hungary

Summary

Hungary's National Hydrogen Strategy is giving a priority to the seasonal storage capacity of electricity in cooperation of the existing electrical- and natural gas infrastructure. Although there are solutions for electricity storage in energy form, such as battery packs, none of them are on the scale of the needed capacity.

However, the problem of seasonal storage could be solved with a different method, by converting the energy into a physically storable form via gas molecule, which can be inserted in large quantities into underground structures, thus, the problem of hydrogen storage is important (Bent 2007). In numerous papers written regarding this topic, salt domes were found to be the most potential formations for underground storage (Małachowska et al. 2022). Several existing cases can be found where hydrogen underground storage tanks were made artificially in such formations with success. In the country no salt domes are present, therefore depleted porous hydrocarbon reserves as the second most favorable solution are available for storage. However, before such actions in such formations can be taken, further research is needed regarding the long-term hydrogen storage at high pressure and temperature. One of the major concerns of hydrogen storage is the possibility of migration through the cap rock, geochemical modifications, or even structural damage of the bearing rock material.

The Mining and Energy Institute of the University of Miskolc, within the framework of the National Renewable Energy Laboratory project, takes part in answering these questions. During the research, the effects of hydrogen-mixed natural gas storage are examined on rock samples taken from the potential underground porous formations. Experiments are carried out using custom-designed and built rock testing equipment with a newly developed measurement procedure. The method is based on the measurement of steady state permeability according to the well-established API RP 40 standard and is novel in that it uses a control gas rather than hydrogen itself to determine the

rock parameters before and after the hydrogen treatment. The method relies on the principle presented in the experimental work made by Klinkenberg (1941), who found that permeability as a property of rock could be determined by any fluid. In theory changes developed in the samples after the hydrogen treatment can be measured and detected by the control gas.

In the paper, the authors present the literature history of the measurement method and outline their proposed modified procedure.

Keywords: greenhouse effect, natural gas, hydrogen, storage, subsurface

Bevezetés

Az európai uniós klímavédelmi törekvések jelentős utat jártak be az elmúlt két évtizedben. 2005-ben került bevezetésre az ETS, a világ első kibocsátáskereskedelmi rendszere. Jelentős lépcsőfok volt 2018-ban a Tiszta Energia Csomag, mely megnyitotta a lehetőséget a fosszilis tüzelőanyagok szén-dioxid-kibocsátásmentesre történő lecseréléséhez. 2021-ben a Fit for 55 csomag 2030-ig üvegházhatású gáz kibocsátásának 55%-os csökkentését irányozta elő. A folyamat 2022-ben jelentősen felgyorsult az orosz tüzelőanyagoktól való függetlenedés fényében a REPowerEU intézkedési csomag által. Ugyanebben az évben elkezdődött a gáz- és hidrogéndirektíva kialakítása, mely várhatóan 2024-ben elfogadásra kerülhet. Amennyiben ez megtörténik, Magyarországnak csupán 1-2 éve lesz annak hazai jogrendbe történő implementálására. Az európai hidrogénstratégia nem többet tűz ki maga elé, mint 2030-ra 20 millió tonna hidrogén termelését éves szinten. A 2021-ben megjelent Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája, mely 2030-ra kiemelt célként fogalmazza meg a villamosenergia- és a földgáz-infrastruktúra együttműködésével megvalósítható szezonális áramtárolási képességet. 60 MW átlagos szabályozási képességet kellene elérni, melyre a megújuló forrásból megtermelt és a rendszerben feleslegben megjelenő villamos energiával előállított vízbontott hidrogén lehet a megoldás. A hidrogén már anyag formájában tárolható, és a földgáz-infrastruktúra is igénybe vehető a szállításához és a szezonális tárolásához. A tároláshoz, mely föld alatti kimerült szénhidrogénmezőkben nagy mennyiségekben lehetséges. Ehhez előtte azt fel kell készíteni, vizsgálni kell a hidrogénállóságát, valamint a hidrogénmegtartó képességét és a kapcsolódó rendszer-elemekét. Európa-szerte és Magyarországon is számos projekt indult az elmúlt években a hidrogén földgáz-infrastruktúrába történő illeszthetőségére, mind a szállítás, az elosztás, a felhasználás és természetesen a tárolás területén. A Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium projekt keretében a Miskolci Egyetem a hidrogénnel kevert földgáz föld alatti gáztároló formációkban történő elhelyezhetőségét vizsgálja egy egyedi tervezésű és építésű kőzetvizsgáló berendezés segítségével.

A föld alatti gáztárolás geológiai és műszaki peremfeltételei

Magyarország geológiai helyzetéből adódóan a sódómok hiánya miatt csupán a porózus tároló kőzetek alkalmazása jöhet szóba. Az országban végzett jelentős számú geológiai felmérés, valamint azok évtizedekre visszanyúló szénhidrogénipari adatháttere miatt igen jó kép tárulhat elénk a potenciális formációk kilétéről (Lakatos et al. 2022).

Jelentős nehézségeket okoz a kapacitás vizsgálata során azonban annak ténye, hogy a szóba jöhető tárolók paraméterei és viselkedési mechanizmusai ugyan ismeretek, de azok jelen telítettségi állapotukra igazak. Ezáltal a hidrogén gázhalmazállapotban történő tárolása esetében fellépő többfázisú áramlási viszonyok kialakulásáról (Vadászi 2022), valamint az azokat befolyásoló paraméterekről még nem áll rendelkezésünkre megfelelő mélységű adat. Annak érdekében, hogy a már ismert tárolók viselkedését leírassuk ezen új fluidum jelenlétében, szükségeszerű az azokból származó kőzetminták paramétereinek vizsgálata a hidrogén jelenlétében is.

A föld alatti kőzetek tárolókapacitásának vizsgálatakor számos petrofizikai paraméter ismeretére van szükségünk. Ezek leírják a kőzet, a fluidumok és azok egymásra gyakorolt hatásait (kőzet-fluidum, fluidum-fluidum). Először az azon rendelkezésre álló térfogatot szükséges meghatározni, melyben a fluidumok felhalmozódhatnak, és amely csak egy töredéke a formáció geometriai kiterjedésének. A porozitás nem más, mint a kőzet egységnyi látszólagos térfogatában jelen lévő, annak anyaga által nem elfoglalt térfogatok (pórusok) összegének és a vizsgált egységnyi látszólagos térfogatnak az aránya. Egyszerűbben megfogalmazva az egységnyi térfogatra eső pórusok térfogatának hányadosa. A paraméter egyik legelfogadottabb mérési módszere a gázos piknometria, mely esetében a kőzet tényleges, azaz mátrix térfogata kerül meghatározásra. A potenciális tárolók esetében ezek ismertek, így különösebb problémát nem jelentenek.

A porozitás mellett szükséges továbbá annak pillanatnyi telítettségi arányainak ismerete. Akviferek estében ez egyszerű, ugyanis a pórusokat teljes egészében rétegvíz

telíti. Kitermelt szénhidrogén-tárolók esetében ez már egy kicsit problematikusabb, ugyanis szükséges a kezdeti telítettségi viszonyok (termelés előtti), valamint a kitermelt fluidumok mennyiségének ismerete, ezzel meghatározva a felhagyáskor fellépő telítettségi egyensúlyi állapotot. A telítettségi állapotok ismerete kritikus, ugyanis azok alakulásából határozható meg azon tényleges térfogat, mely a hidrogén tárolására szolgálhat.

További kritikus közetparaméter a permeabilitás, avagy más néven áteresztőképesség. Ezen paraméter ismeretében állapítható meg, hogy a fluidumok a kőzet adott térfogatában történő átáramlása során mekkora ellenérővel találkoznak. Olyan összetettebb tényezők meghatározásához szükséges, mint a relatív permeabilitás, ami a többfázisú áramlások esetében definiálja a nyomásváltozások jellegét.

A permeabilitás tehát bemutatja az adott térfogatú kőzetben jelen lévő, kapcsolatban lévő pórusokon keresztül történő, a fluidum állandó térfogatáram melletti áramlásakor fellépő nyomáskülönbség értékét. Ezen paraméter a kőzet anyagának, nem pedig a folyadék tulajdonságának tudható be, így az áramló fluidumtól függetlenül állandó értékkel jelentkezik. Igaz a gáz, illetve a folyadék halmazállapotú fluidumokra is. Ez természetesen mindaddig igaz, amíg az áthaladó folyadék nem okoz semmilyen jellegű elváltozást a kőzetben. Példaképpen egy magasabb agyagtartalmú homokkő esetében, amennyiben nem megfelelő sótartalmú vagy sótól mentes desztillált vizet alkalmazunk, úgy az az agyagásványok térfogatának megváltozásához vezethet (Dócs-Baracza 2022). A fellépő térfogatváltozás lehet duzzadás, illetve összehúzódás, mely a fluidum kompatibilisre történő cseréjét követően visszaállhat, vagy akár maradandó elváltozást is okozhat. Példaképpen említendő a *fine migration*, ahol a nem megfelelő fluidum az agyagos kőzetben a nem tökéletesen cementálódott szemcsék leválásához, majd elakadásához vezet. Bizonyos esetben akár le is zárhatja a póruscsatornákat, ezzel elzárva az áramlási útvonalat.

A rétegekben jelen lévő gáznemű fluidumok esetében ilyen modifikáló tényezők jelenlétéről nem gyakran tesznek említést a szakirodalomban. A petrofizikai paraméterek meghatározására használt gázok esetében sincs ilyen jellegű probléma. A hidrogénnél ez már nem ilyen egyszerű, számos esetben történtek feljegyzések a hidrogén föld alatti tárolásával kapcsolatosan problémák észleléséről (Lakatos et al. 2022).

Ismertek például a hidrogén-rétegvíz-kőzet geokémiai reakciói által jelentkező nehézségek. Az említett problémák közé tartozik a gáz nagymértékű vesztesége és szennyeződése (H_2S kialakulása), a besajtolási nyomás növekedése, illetve csökkenése (ásványképződés, avagy -oldódás), a kőzet mechanikai tulajdonságainak megváltozása.

A lehetséges komplikációk felderítése érdekében szükség van a potenciális tárolókból származó minták hidrogénnek való kitettségi vizsgálatára. Elképzeléseink szerint a mintatestek hidrogénnel történő permeabilitásvizsgálata során detektálhatók válnak bizonyos kedvezőtlen hatások, ugyanis a gázzal történő mérés alapvető feltétele az állandó térfogatáram, avagy az állandó nyomáskülönbség megléte. Amennyiben a kőzetben elváltozás lép fel, mely befolyásolja az áramlási térfogatot, úgy az az áramlás fenntartásához szükséges indítónyomás értékének változásához vezet majd.

Méréstechnikai szempontból azonban ez nem megfelelő számunkra, ugyanis az áteresztőképesség csak azon pontok felhasználásával számítható, melyeket változás már nem terhel. Ha a nyomásváltozás lassú, úgy a mérés ideje nagymértékben megnövekedhet. A folyamatos áramoltatás miatt jelentősen megnövekedik az elhasznált mérőgáz mennyisége, mely növelheti a mérési költségeket.

További nehezítő tényező, hogy a mérés során kiáramló gáz robbanásveszélyes közeg, így a mérés helységéből kivezetésre kell kerülni. A hidrogén egyéb jellemzői miatt maga az eszköz kialakítása, illetve az annak elhelyezésére szolgáló helyiség esetében is figyelembe kell venni az RB besorolás szabályozásait.

Felmerült annak lehetősége, hogy a mérési metodikában a hidrogénnel történő kezelés, illetve a paraméter mérése külön eszközökkel történjen. Ez esetben egy méréstechnikai szempontból biztonságos gáz kerülhet alkalmazásra a berendezésben. A hidrogén pedig egy különálló cellában kerülhet kontaktusba a mintatesttel. Ebben a kezelőcellában a mintatest egy előre meghatározott időintervallumig lenne elárasztva a hidrogénnel. A feltöltéskor beállított nyomás folyamatos monitorozása pedig lehetővé tenné a kőzetben történő térfogatváltozások detektálását. A paraméter méréseit így a kezelés előtt, illetve után elvégezve meghatározhatóvá válik a permeabilitásban bekövetkezett változás. Ezzel a megoldással már elegendő lenne a kezelő cella RB besorolása, melyet külön helyiségben elhelyezve a személyzettől elválasztva működtetve, jelentős mértékben csökkentené az eljárás kockázatát.

Ezen elképzelést hallva azt feltételezhetnénk, hogy a kontrollgáz esetében nem ugyanazon érték jelentkezne, mint a hidrogén esetében. Azonban, mint az már említésre került, a permeabilitás nem a fluidum tulajdonsága, hanem a kőzeté. Ezzel a különböző gázok, illetve folyadékok esetében mért értékének azonosnak kell lennie. Ezt a múltban számos kutató cáfolta meg, amikor a gázzal végzett méréseik által számított érték minden esetben meghaladta a folyadékkal mért értéket. Elsőként *Klinkenberg (1941)* bizonyította be mérései alapján ennek igazságát.

Kutatása alapján megállapította, hogy az eltérés azon jelenségre vezethető vissza, hogy a gázok a kőzet szempontjából nem nedvesítő közegekként viselkednek. Ennek eredményeként nem képeznek immobilis filmréteget annak felszínén, mint a folyadékok, így nem csökkentve a rendelkezésre álló áramlási keresztmetszetet. Ezen jelenség az úgynevezett *slip*, mely szerint a gázok áramlásakor azok a fal mellett egy állandó sebességet tartanak,

ezzel nem csökkentve az áramlási keresztmetszetet. A *slip* effektus felismerése mellett mérési eredményeinek köszönhetően egy másik kritikus jelenségre lett figyelmes. Mérései során az eltérő gázok esetében állandó nyomásértékek mellett eltérő permeabilitásokat határozott meg. Az értékek közötti eltérések azonban az alkalmazott nyomáskülönbségek növelésével csökkenő tendenciát mutattak. Köztudott, hogy a gázok nyomásváltozás hatására jelentős mértékű térfogatváltozásra képesek. Azonban a nyomás növelésével az elérhető térfogatcsökkenés mértéke csökken. Az adott mennyiségű gáz térfogatának csökkenésével a részecskék mozgási tere csökken, a rendelkezésükre álló tér kevesebb. A mérések során tapasztalt jelenség a gázok eltérő átlagos szabad úthosszának eredménye volt. A gázok ezen specifikus paramétere ad információt arról, hogy egy molekula átlagosan mekkora utat tesz meg, mielőtt egy másikkal ütközve irányát módosítaná. Alacsonyabb nyomások esetében a különböző gázok szabad úthosszai jelentősen eltérnek, azonban a nyomás fokozásával az azok közötti eltérések mérséklődnek. Ennek eredményeként a magasabb nyomáskülönbségek alkalmazásával azok hatása felülírható.

Klinkenberg mérései során ezt felismerve, eredményeit egy infinitézimálisan magas indítónyomás esetében fellépő végtelenül magas nyomáskülönbség értékére interpolálva megállapította, hogy a különböző gázok áteresztőképességei azonosakká válnak. Az interpolálási pontban jelentkező nyomás esetében a gázok már összenyomhatatlan folyadékokként viselkednek, reprodukálva a folyadékok esetében mért értéket. Méréseit követően állításait igazolva kidolgozta a gázos mérések során alkalmazandó korrekciós eljárását. Korrekcióját tekintve elmondhatjuk, hogy bármely gáz esetében mért permeabilitás korrigálható annak érdekében, hogy a tényleges, folyadékok esetében érvényes érték meghatározható legyen. Az indító és érkező nyomások középértékének reciprok értékét végtelenül kicsinek feltételezve meghatározhatjuk a tényleges, folyadékok esetében mérhető áteresztőképességet. Klinkenberg eredményeit azóta számos más szerző munkája megtámogatta, és eljárása a hatályos petrofizikai mérési szabványban API RP 40 (1998) is rögzítésre került. A szabvány szerint eljárva a mérési adatok felhasználásával lehetőség van mind az elméleti folyadékpermeabilitás, mind pedig a Klinkenberg korrekciós tényező ($b_{\text{Klinkenberg}}$) meghatározására.

Fontos információ, hogy mérései során az egyik alkalmazásra került gáz maga a hidrogén volt, ezzel ismételtén megerősítve elképzelésünket két szempontból is. Az egyik, hogy a hidrogén eredményei is konvergáltak más gázok eredményeihez, a másik pedig egy még eddig nem megvitatott kérdésünkre adhat választ. Amennyiben a hidrogén okoz elváltozásokat a kőzetben, az nem feltétlenül a dinamikus esetben, hanem a statikus esetben jelentkezik majd. Itt statikus esetben a hidrogén a kőzetben tárolt ciklusára, nem pedig abban történő áramlását értve. Mivel nagy valószínűséggel a már említett elválto-

zásokhoz idő szükséges, így a hidrogén folyamatos áramoltatása esetében nem biztos, hogy azok kialakulnak. Ebben az esetben még célszerűbbé válik a kezelőcella alkalmazása.

A mérési módszer elméleti helyességét alátámasztva a következőkben ismertetjük a mérés során alkalmazandó általunk kidolgozott protokoll fontosabb elemeit.

Vizsgálati anyag és módszer

A Miskolci Egyetem Bányászat és Energia Intézetének munkatársai által a már említett API RP 40 szabvány figyelembevételével a következő mérési protokoll került kidolgozásra az új kőzetvizsgálati eljáráshoz.

A mérés során a porózus tárolókból származó fűrőmagokból kialakításra kerülnek a mérésre alkalmas hengeres mintatestek. A mintatestek kialakításánál a fűrési irány a fűrőmagok palástjára merőleges, a fluidumok kútba történő áramlási irányának megfelelően.

A mintatestek kialakítását követően attól függően, hogy azok tartalmaznak-e szénhidrogént, vagy nem, egy vegyszeres kezeléssel kell átészniük annak érdekében, hogy azokat eltávolítva felszabadítsuk azok teljes pórus-térfogatát. Fontos továbbá, hogy a méréseket megelőzően a mintatesteket mindennemű folyadéktól megszabadítsuk. A szárítási eljárás általánosan a mintatest súlyállandósulásáig történik 100 °C hőmérséklet alkalmazása mellett. A szárítási hőmérsékletet az országban fellelhető tárolók tulajdonságait figyelembe véve az API RP 40 szabvány szerint választottuk ki. Természetesen különleges esetekben ezt módosítani szükséges. A mintákat gyakorlati tapasztalataink szerint célszerű mindaddig a szárítószekrényben tartani, amíg azok mérésére sor kerül. A mérést megelőzően szükséges időt biztosítani azok szobahőmérsékletre történő visszahűlésére egy exsikkátorban elhelyezve. Ezzel minimalizálható az esetleges párákicsapódás annak pórussterében. Természetesen a mérést megelőzően csak a szárított súllyal meg egyező minta kerülhet az eszközbe beszerelésre. A minta lehűlése fontos, ugyanis a gáz felmelegítésével megváltozik annak viszkozitása, befolyásolva ezzel a mérést.

A mintatartóba történő beszerelést követően szükség-szerű a mérési helyiség atmoszférikus nyomásának, valamint hőmérsékletének rögzítése. A helyiség nyomásértékére a permeabilitásszámítás során lesz szükség, ugyanis a minta kiáramlási oldalán ezen nyomás szolgáltatja az egyenletben feltüntetett p_a értékét. A helyiség hőmérsékletére a mérő gáz viszkozitásának számítása során lesz szükség (*American Petroleum Institute 1998*). Fontos továbbá megjegyezni, hogy termosztáttal nem ellátott mérőkör alkalmazása során célszerű a helyiség hőmérsékletének állandó értéken történő tartása a mérés ideje alatt, a gáz sűrűségének, valamint viszkozitásának hőmérséklet-érzékenysége miatt.

A minta ezt követően egy Hassler típusú magbefogóba kerül elhelyezésre, melynek sajátossága, hogy három nyílással rendelkezik. A cella tetején lévő a fluidum min-

tába történő bejuttatására, a másik pedig abból történő kijuttatására szolgál. A harmadik port a köpenynyomás ráadására szolgál. A köpeny feladata a mintatest felületének lezárása, ezzel biztosítva, hogy a beáramló gáz a minta térfogatán keresztül áramoljon át. Az ehhez szükséges nyomás egy folyadékpumpával biztosítható, desztillált víz felhasználásával. Gyakorlati tapasztalataink alapján az indítónyomás értékén felül 20 bar túlnyomást tartva megfelelő zárás alakítható ki.

A szükséges köpenynyomás beállítását követően megkezdődhet a mintatest mérése. A mérés során úgynevezett *steady state* eljárást alkalmazunk. Az állandó térfogatáram beállítását követően rögzítésre kerül a kiáramlási nyomás mellett észlelt állandósult indítónyomás értéke, ezzel meghatározva az adott térfogatáramú ismert viszkozitású gáz a minta keresztmetszetén és annak hosszában történő átáramlása során vele szemben fellépő ellenállás értékét, ezzel rögzítve az első mérési pontot. Célszerű első pontként olyan térfogatáram használata, ahol a legkisebb stabil p_1 nyomást észleljük, ezzel regisztrálva a legkisebb az áramláshoz szükséges nyomásviszonyt.

Az eljárás során kritikus, hogy az alkalmazott térfogatáramok minden esetben lamináris tartományba tartozzanak, mivel a Hazen–Darcy-egyenlet (Otaru–Morvan–Kennedy 2018) turbulens esetekre nem érvényes. A mérés során ezen feltétel a következőképpen ellenőrizhető. Alkalmazva az egyenlet összenyomható fluidumok esetében érvényes formáját, felrajzolható az 1. ábrán látható diagram. Amennyiben az alkalmazott térfogatáramok lineáris profillal jelentkeznek, az ábra szerint egy az origóból induló lineáris egyenletet kapunk, mely meredeksége a feltüntetett módon a permeabilitás és viszkozitás arányaként határozható meg:

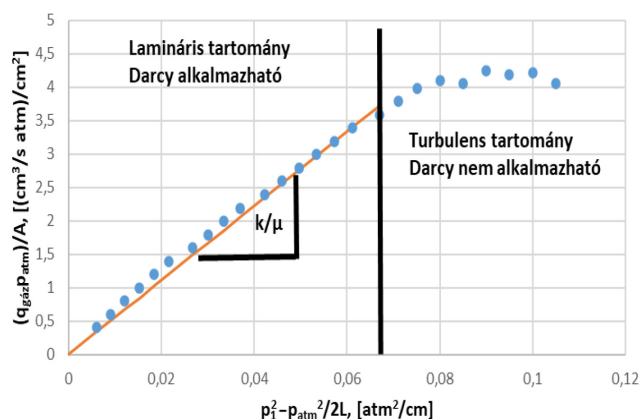
$$k_{g \text{ abszolút}} = \frac{2 p_{\text{atm}} q_{\text{gáz}} \mu L}{A(p_1^2 - p_{\text{atm}}^2)} 1000.$$

Amennyiben az ismert keresztmetszetű (A , cm^2) adott hosszúságú (L , cm) hengeres mintatesten állandó térfogatárammal ($q_{\text{gáz}}$, cm^3/s) áthaladó, adott dinamikus viszkozitású (μ , cP) gáz esetében az indító- (p_1 , atm) és kilépőnyomások (p_{atm} , atm) ismertek, úgy annak abszolút permeabilitása ($k_{g \text{ abszolút}}$, mD) meghatározható.

Ezzel ellentétben esetben egy horizontális egyenes egyenletét kapva a mért pontok turbulens áramlási viszonyt jeleznek. A lamináris áramlási tartományban maradván több stabil térfogatáram esetében meghatározásra kerül az annak fenntartásához szükséges stabilizált p_1 indítónyomás. A mérés során célszerű a térfogatáramok azonos léptékben történő növelése, a kiértékelés megkönnyítése végett. A mérési pontok meglétét követően kerülhet sor az eredmények kiértékelésére, mely az API RP 40 szabvánnyal leírtak szerint történik.

A számított permeabilitásértékek, valamint a hozzájuk tartozó nyomás-középtértékek reciprokainak ismeretében felrajzolásra kerülnek a mérési pontok. Klinkenberg

A mérés során fellépő áramlás jellege



1. ábra

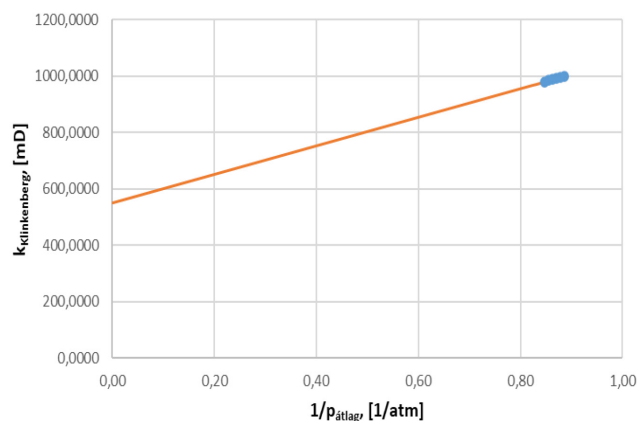
Az áramlás jellegét ellenőrző diagram (Az ábra saját szerkesztés, csak szemléltető jellegű, nem mérési eredményeken alapul)

egyenletének meghatározása érdekében a felrajzolt pontokra lineárist illesztve meghatározásra kerül annak metszéspontja, valamint meredeksége (2. ábra). A Klinkenberg-egyenletet felírva és átrendezve láthatóvá válik a lineáris egyenlet megoldóképlete ($y = (x * a) + b$), miszerint a metszéspont megegyezik a folyadékok esetében mért permeabilitás értékével ($k_{\text{folyadék}}$, mD), a meredekség pedig a folyadékpermeabilitás és a Klinkenberg konstans szorzatával ($k_{\text{folyadék}} * b_{\text{Klinkenberg}}$):

$$k_{\text{gáz}} = k_{\text{folyadék}} \left(1 + \frac{b_{\text{Klinkenberg}}}{p_{\text{átlag}}} \right) = k_{\text{folyadék}} + \frac{k_{\text{folyadék}} b_{\text{Klinkenberg}}}{p_{\text{átlag}}}$$

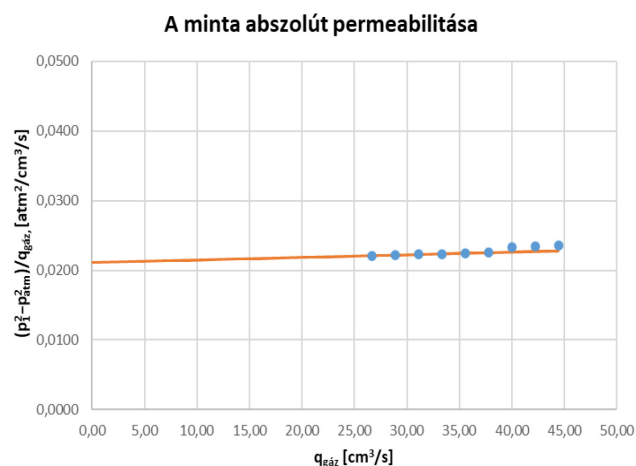
A legtöbb esetben azonban a Klinkenberg-paraméterek mellett az úgynevezett abszolút gázpermeabilitás is megadásra kerül, mely nem más, mint a 3. ábrán prezentált lineáris illesztés $x = 0$ értékénél vett metszéspont által számított áteresztőképesség.

Klinkenberg korrigált permeabilitás



2. ábra

A mérési pontokból származtatott Klinkenberg-egyenes (Az ábra saját szerkesztés, csak szemléltető jellegű, nem mérési eredményeken alapul)



3. ábra Az abszolút gáz permeabilitására szolgáló lineáris illesztés (Az ábra saját szerkesztés, csak szemléltető jellegű, nem mérési eredményeken alapul)

A fent látható lineáris metszéspontjában található $(p_1^2 - p_{\text{atm}}^2) / q_{\text{g}}$ érték reciprokát felhasználva határozható meg az úgynevezett abszolút gázos permeabilitás a már ismert módon.

A Klinkenberg-egyenlet, illetve az abszolút permeabilitás meghatározását követően a minta a hidrogénes kezelőcellába kerül egy előre meghatározott időintervallumig. Majd ismételt permeabilitásmérésre kerül sor, összevetve a kezelés előtti, illetve utáni állapotokat.

Mivel maga az eszköz még nem készült el, így mérési eredményekkel nem szolgálhatunk, de maga az újszerű mérési elv bemutatásra került. A feldolgozott szakirodalom ismeretében az egyedüli probléma a hidrogén okozta elváltozások mérés technikai észlelhetősége. Ennek kiküszöbölése érdekében felmerült annak lehetősége, hogy a mintatest kialakítása során annak mérési hossza történő vágásakor megmaradó kőzetanyagok alkalmasak lennének vékonycsiszolatos mikroszkóp vagy röntgen diffrakciós minták kialakítására. Ezzel rendelkezésre állnának a geokémiai elváltozást feltáró más módszerek is.

Összefoglalás

A Miskolci Egyetem Bányászat és Energia Intézetében a hidrogén föld alatti porózus kőzetekben történő tárolhatóságának vizsgálatára szolgáló új kísérleti berendezés és eljárás került kidolgozásra. Habár az eljárás a már ki-
forrott API RP 40 szabvány szerint leírt steady state per-

meabilitás mérésén alapul, újszerűsége abban rejlik, hogy nem maga a hidrogén, hanem egy kontrollgáz segítségével határozzuk meg annak mérési értékeit. Ezáltal a minta kezelésére szolgáló cellában történik meg a kőzet hidrogénes elárasztása. A permeaméterrel pedig a kezelést megelőző és az azt követő állapotok kerülnek megvizsgálásra. Az elmélet szerint a kőzetben bekövetkező változások észlelhetőkké válnak úgy, mint a kezelőcella- és az áteresztőképesség-mérések során is. A metodika kidolgozásánál a Klinkenberg korrekciós kutatások eredményeit, valamint a hidrogénnel járó biztonsági kockázatok tényszerűségeit vettük figyelembe.

Köszönetnyilvánítás

A mérési elv kidolgozása és a mérési rendszer megépítése az RRF-2.3.1-21-2022-00009 azonosító számú, Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium megnevezésű projekt a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával valósul meg, a kutatás geológiai és műszaki peremfeltételeinek meghatározását az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program Fenntartható Technológiák Alprogram (FFT NP FTA) támogatta.

Irodalomjegyzék

- American Petroleum Institute (1998) Recommended Practices for Core Analysis. Recommended Practice 40 Second Edition
- Bent, S. (2007) Underground hydrogen storage in geological formations, and comparison with other storage solutions. Hydrogen Power Theoretical and Engineering Int. Symp. Merida Technical University
- Dócs R., Baracza M. K. (2022) The importance of permeability measurement in the design of geothermal installations. Lectures of 16th International Scientific Conference on Mineral Waters of the Carpathian Basin, pp. 14–19.
- Klinkenberg, L. J. (1941) The permeability of porous media to liquids and gases. Drilling and Production Practice API-41-200
- Lakatos I., Vadászi M., Szunyog I., Galyas A. B. (2022) A hidrogén porózus közegben történő tárolása. Bányászati és Kohászati Lapok-Bányászat, Vol. 155. No. 1–2. pp. 62–69.
- Małachowska, A., Lukasik, N., Mioduska, J., Gebicki, J. (2022) Hydrogen Storage in Geological Formations—The Potential of Salt Caverns. Energies, Vol. 15. No. 14. <https://doi.org/10.3390/en15145038>
- Otaru, A. J., Morvan, H. P., Kennedy, A. R. (2018) Measurement and simulation of pressure drop across replicated porous aluminium in the Darcy-Forchheimer regime. Elsevier Acta Materialia, Vol. 149. pp. 265–273.
- Vadászi M. (2022) A felszín alatti hidrogéntárolás rezervoármérnöki megközelítése. XXIII. Nemzetközi Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) pp. 1–5. <https://ojs.emt.ro/bkf/article/view/923/858>