

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK

SOR LEVENTE
TDK DOLGOZAT

Szorpciós izoterma mérőállomás fejlesztése és megépítése

Témavezető:

Dr. Poós Tibor
egyetemi docens

Budapest, 2023

Tartalomjegyzék

1. Jelölésjegyzék	2
2. Bevezető	3
3. Szakirodalmi áttekintés	5
3.1. A szorpciós izoterma jelentősége	5
3.2. Szorpciós izoterma mérési módszerek	6
3.2.1. Gravimetrikus mérés	6
3.2.2. Dinamikus gőzszorpció-DVS	7
3.2.3. TGA-DSC kombinált módszer	9
3.2.4. A módszerek összehasonlítása	10
4. Mérőállomás tervezés és megépítés	11
4.1. Előzmények	11
4.2. Sók kiválasztása	12
4.3. Szárítás	15
4.4. Az edény	15
4.5. A nehezék	18
4.5.1. Szükséges nehezék tömegének becslése	18
4.5.2. A nehezék rögzítése	20
4.6. Az edények száma és az elválasztó lemez	21
4.7. A mintatartó kosár	22
4.8. Mintatartó üvegek	23
4.9. A mérőállomás összeszerelése	24
4.10. Mérés menete	25
5. Összefoglalás	28
6. Irodalomjegyzék	30

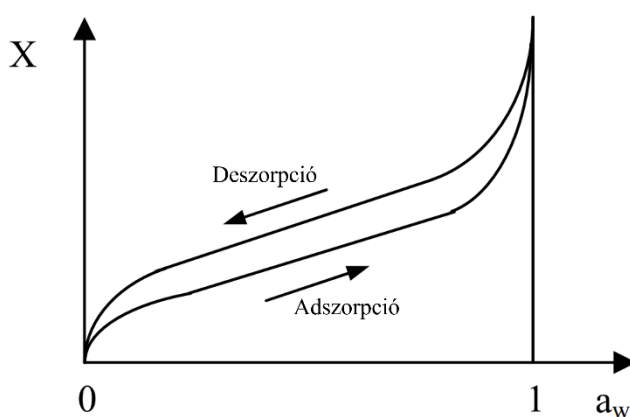
1. JELÖLÉSJEGYZÉK

p	parciális nyomás	Pa
p^*	tenzió	Pa
a_w	víz aktivitás	1 v. %
φ	relatív nedvességtartalom	1 v. %
X	abszolút nedvességtartalom	kgH ₂ O/kgdP
m_{glass}	mintatartó üveg tömege	kg
m_{sol}	standard oldat tömege	kg
m_{weight}	nehezék tömege	kg
m_{dp}	minta száraz tömege	g
m_{tare}	táratömeg	g
m_{wp}	nedves anyag tömege	g
g	gravitációs gyorsulás (9,81 m/s ²)	m/s ²
V_{glass}	oldattartó üveg térfogata	m ³
ρ_{H_2O}	víz sűrűsége	kg/m ³
V_{sol}	a standard oldat térfogata	m ³

2. BEVEZETŐ

A TDK dolgozatom témája szorpciós izotermát meghatározó mérőállomás tervezése és megépítése. A szorpciós izoterma egy fontos anyagi jellemző, segítségével vizsgálhatók a nedves levegő és a szilárd szemcsés anyag közötti adszorpciós vagy deszorpciós folyamatok. Ez a görbe a környezeti levegő relatív nedvességtartalom (φ) függvényében ábrázolja az anyag nedvességtartalmát egy adott környezeti hőmérsékleten.

A mérés során egy zárt térben állandó és pontosan ismert hőmérsékletet és relatív nedvességtartalmat biztosítunk. Ebbe a térbe rakjuk a vizsgálni kívánt anyagból vett kismintát, majd kivárjuk, amíg beáll az egyensúly a légtér és a minta között, ami akár több napot is igénybe vehet. Ekkor lemérjük annak tömegét, majd totális szárítást követően megmérjük a száraz tömeget is. A kettő különbsége megadja a felvett víz tömegét. Ezt megmérjük a lehető legtöbb φ mellett ugyanazon a hőmérsékleten. Ezekből az adatokból számított anyag nedvességtartalom a φ függvényében a szorpciós izoterma görbe egy-egy pontját adják. Egy tipikus szorpciós izotermát szemléltet az 1. ábra.



1. ábra Általános adszorpciós és deszorpciós izoterma [1]

Az 1. ábrán megfigyelhető, hogy a vízszintes tengelyen nem a relatív nedvességtartalmat (φ), hanem a levegőben lévő víz aktivitását (a_w -water activity) ábrázolják.

$$a_w = \frac{p}{p^*},$$

ahol p a kisminta fölötti légtérben a vízgőz parciális nyomása [Pa], p^* pedig a levegő tiszta vízre vonatkoztatott tenziója az adott hőmérsékleten [Pa]. Az értéke a gyakorlatban megegyezik a %-ban kifejezett relatív nedvességtartalom század részével. Termodinamikailag megalapozottabb a víz aktivitást használni, mert az aktivitás értelmezhető akár a fentitől eltérő módon, tökéletes gázok nem ideális elegyére is, így a fogalom szélesebb körben használhatóbbá válik [2].

A másik megfigyelhető tulajdonság a diagramon a hiszterézis, ami azért alakul ki, mert a szilárd anyagok adszorpció és deszorpció esetén más görbe mentén változtatják a nedvességtartalmukat. Ez a mérés szempontjából kiemelten fontos, egy mérés előtt el kell dönteni, hogy adszorpciót vagy deszorpciót szeretnénk mérni.

A szorpciós izotermát felhasználva meghatározható például az a minimális anyag nedvességtartalom, ami alá adott szárítólevegő nedvességtartalom és hőmérséklet esetén nem lehet menni egy szárítási eljárás során. Meghatározhatók továbbá optimális tárolási körülmények egy adott termék esetén, vagy éppen segít egy épület tervezésénél az éghajlati viszonyoknak megfelelő szigetelőanyag kiválasztásában.

A témavezetőmmel végzett munkám eredményeképpen a Tanszéken egy működő, szorpciós izoterma mérésére alkalmas berendezés készült el.

3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Először bemutatom a szorpciós izotermák gyakorlati jelentőségét, majd a különböző mérési módszereket szeretném összehasonlítani.

3.1. A szorpciós izoterma jelentősége

Egy anyag adszorpciós és deszorpciós tulajdonságainak ismerete kulcsfontosságú, ha nedvességre érzékeny anyagokkal, illetve folyamatokkal szeretnénk foglalkozni. Ezek az ismeretek lehetővé teszik a tervezők számára a termék optimalizálását, hogy megőrizze a minőségét adott nedvességtartalmú közegben. Az élelmiszeripar, a gyógyszeripar vagy az elektronikai ipar arra használja a szorpciós izotermákat, hogy megfelelő tárolási viszonyokat tudjanak biztosítani a levegő relatív nedvességtartalmának szabályozásával, ezzel megelőzve a túlzott mértékű adszorpcióból következő problémákat [3]. Érdekes példa a szárított és pörkölt kávébabok tárolása, mert ha ez alacsony hőmérsékleten és magas relatív nedvességtartalom (φ) mellett történik, akkor a kávé minősége jelentősen romolhat, mire eladásra kerül. Ennek elkerülésére érdemes ismerni az adott kávé szorpciós izotermáját [4].

A szorpciós izotermák kulcsfontosságú szerepet játszanak nemcsak a tárolásnál, hanem magánál ipari szárítási folyamatnál is. Segítségével meghatározhatók az ideális szárítási körülmények, például a hőmérséklet vagy a légtér relatív nedvességtartalma [3]. A szorpciós izoterma és a szárítás kapcsolatára jó példa a biogáz üzemek fermentációs maradékának szárítása, melyet ezután trágyaként vagy tüzelőanyagként fel lehet használni, ezzel elősegítve a körforgásos gazdaságot [5].

Az építőiparban a szigetelőanyag kiválasztásakor, illetve a csomagolóiparban a csomagolóanyag meghatározásakor a szorpciós izoterma segít a megfelelő anyagot kiválasztani, mivel lehetőséget ad adott anyag nedvességre adott válaszát is figyelembe venni. A nedvességtartalom változása magával vonhatja a mechanikai tulajdonságok drasztikus változását, például szakítószilárdságét vagy deformációs tulajdonságok változását. A szorpciós izoterma segítségével előre jelezhetők ezek a változások és a tervezett konstrukció ennek megfelelően módosítható. Így a választott szigetelő, illetve csomagolóanyag megfelelően fog teljesíteni az adott időjárási és éghajlati körülmények között [6].

3.2. Szorpciós izoterma mérési módszerek

Különböző jól kidolgozott módszerek léteznek a görbék pontjainak kísérleti meghatározására, melyeket jellemzése és összehasonlítása fontos, ha meg akarjuk találni a megfelelő módszert a méréshez.

3.2.1. GRAVIMETRIKUS MÉRÉS

Az adszorpciós vagy deszorpciós izoterma egy pontjának meghatározásának alapja, hogy a vizsgálandó anyagot egy zárt térbe helyezük, ahol állandó hőmérsékletet és relatív nedvességtartalmat biztosítunk. Adszorpciós mérés előtt a minta teljes kiszárítása szükséges, mely történhet ekszikkátorban, de legtöbbször szárítószekrényt használnak erre acélra. Deszorpciós mérés esetén pedig a vízzel való telítés szükséges, mely elvégezhető vízzel való permetezéssel, vagy magas relatív nedvességtartalmú térbe való helyezéssel.

A minta tömegét a mérőedénybe való helyezése után rendszeresen mérjük, amíg annak értéke már nem változik. Ha ezt elértük, akkor tudhatjuk, hogy a minta víztartalma egyensúlyban van a környezet relatív nedvességtartalmával az adott hőmérsékleten. Az ilyenkor mért tömeg a nedves tömeg. Ezután a mintát szárítószekrénybe vagy ekszikkátorba helyezve és a vizet eltávolítva megkapható a száraz tömeg. A nedves tömeg és a száraz tömeg különbsége a víztartalom (X). Minden ilyen X - φ adatpár egy pontja lesz a szorpciós izotermának. A relatív nedvességtartalom állandó értéken tartásának érdekében egy zárt térre van szükség, amelyben valamilyen oldat található. Ez lehet kénsav oldat, vagy valamilyen telített sóoldat [7]. A kénsav esetében a különböző koncentrációk különböző φ értékeknek felelnek meg, melyek az idők során már nagy pontossággal kimérésre kerültek, szakirodalomban elérhetőek [8]. A telített sóoldatok esetében a φ -t az anyagi minőség definiálja, mert pl. a NaCl telített oldata más relatív nedvességtartalmú levegővel van egyensúlyban, mint a KOH oldat. A hőmérséklet állandóságát külsőleg biztosítjuk, például egy temperált helység vagy egy vízfürdő segítségével. Hogy egy adott hőmérsékleten (izotermán) több pontot tudjunk egyidejűleg kimérni, az említett állandó hőmérsékletű térbe több mérőedényt is beleteszünk, különböző sóoldatokkal vagy eltérő koncentrációjú kénsavval, ezzel gyorsítva a mérést.

A mérési módszer előnye, hogy a mérési elrendezés egyszerű, például nem tartalmaz mozgó alkatrészt, illetve műszerezettségre is csak kismértékben van szükség. Széles hőmérséklettartományban (0-100°C) használható és a standardok függvényében széles skálán

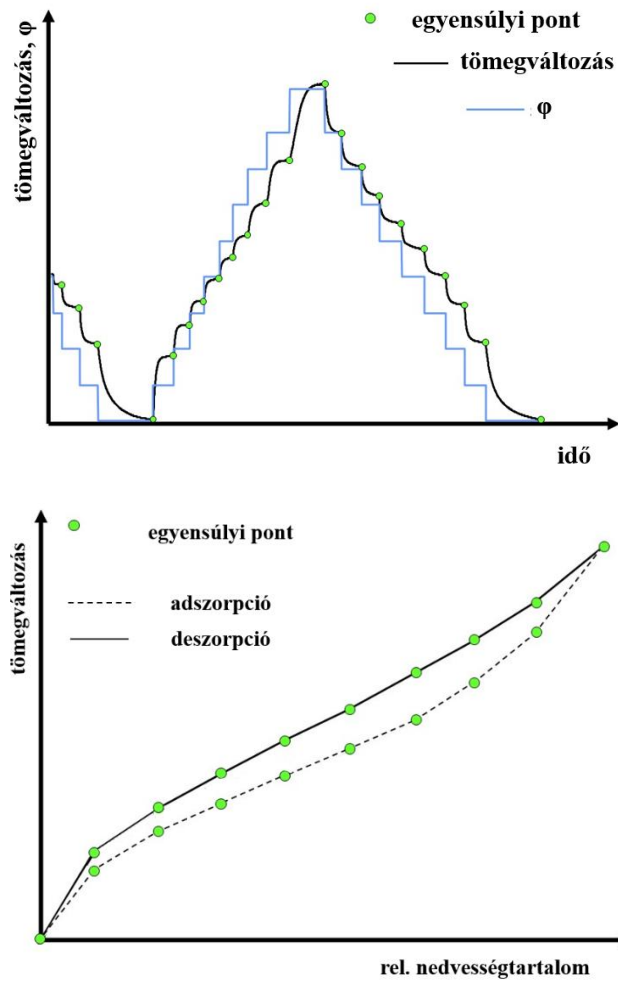
beállítható a φ értéke is. A robusztussága miatt ezt a mérési módszert használják referenciaként, ehhez viszonyítják a többi módszert.

A gravimetria nagy hátránya viszont lassúság, mivel az oldatok feletti páratér és a szilárd minta közötti egyensúly létrejöttéhez nem egyszer akár hetekre is szükség van. Továbbá a könnyen biodegradálható anyagok bomlásnak indulnak, mielőtt elérnék az egyensúlyi állapotot. A baktériumok elszaporodását meg lehet akadályozni egy timollal töltött kapilláris mintatérbe helyezésével [9]. Továbbá a rendszeres tömegmérésekhez a mintát többször ki kell venni a zárt térből, mely után az egyensúlynak ismét be kell állnia, így a mérés tovább lassul. A mérés ideje miatt egyszerre sok mintát kell mérni, mely növeli az esélyét annak, hogy a mérést végző személy összekever adatokat vagy alkatrészeket, az emberi hibázás esélye a mérés kivitelezése során viszonylag nagy [10]. Alacsony diffúziós együtthatók esetén az egyensúly hosszú idő elteltével sem áll be tökéletesen, ezért ilyen minták esetében érdemes lehet az alább ismertetett dinamikus módszerek valamelyikét alkalmazni [11].

3.2.2. DINAMIKUS GŐSZORPCIÓ-DVS

Az említett gravimetrikus módszer automatizált változatának is tekinthető a dinamikus gőszorpció (DVS-Dynamic Vapor Sorption)

A mérést egy dinamikus gőszorpció mérő berendezésben végzik, melyet külön erre a célra gyártanak. A minta egy lezárt térbe kerül, amiben a hőmérsékletet és a relatív nedvességtartalmat egy szabályzórendszer precízen kontrollálja. A mérés során vizsgolt juttatnak a mintatartó térbe, aminek a mennyisége precízen szabályozható, így lehetőség nyílik a φ pontos beállítására. Eközben a hőmérsékletet is állandón tartják. Ahogy a relatív nedvességtartalmat folyamatosan, kis lépésekben változtatják, a minta és környezete között nedvesség csere következik be, melyet indikáló tömegváltozást a műszer rögzíti. A tömeg már nem változik, akkor beállt az egyensúly és jön a következő φ lépcső, ahol a készülék ismét megvárja az egyensúly beálltát. Így az egyes φ lépésekhez tartozni fog egy tömegváltozás érték. Adszorpciós mérés esetén, ha teljesen száraz kiindulási anyagot biztosítunk, akkor a tömegváltozásokat az i -dik elemig összeadva megkapható a teljes tömegváltozás az i . φ értéknél. Ez az összeg a felvett víz tömege, mely a szorpciós izoterma egy pontja is egyben. Ez egy pontos és robusztus módszer az anyagok szorpciós izotermájának meghatározásához.



2. ábra A DVS mérés és az abból előálló izoterma [12]

A dinamikus szorpció módszerének nagy előnye, hogy képes valós idejű adatokat szolgáltatni a minta és a környezete közötti nedvesség cseréről. További előnyként elmondható, hogy itt nemcsak vízgőz adszorpció és deszorpció mérésére van lehetőség, hanem akár szerves oldószerek gőzeiben is lehet mérni, hiszen a φ beállítása nem standard oldatokkal, hanem a bejuttatott gőz mennyiségének változtatásával történik. További előny, hogy a gravimetriáshoz képest gyorsabb mérést tesz lehetővé, illetve nem is igényel annyi emberi figyelmet, hiszen a mérés egy betáplált program szerint, emberi beavatkozás nélkül megy végbe. Hátrányként a mérőműszer bonyolultsága és főképpen annak beszerzési költsége róható fel [13].

3.2.3. TGA-DSC KOMBINÁLT MÓDSZER

A termograviméterikus analízis (Thermogravimetric Analysis-TGA) és a differenciális pásztázó kalorimetria (Differential Scanning Calorimetry-DSC) kombinációja is egyike a szorpciós izotermák meghatározásához használt analitikai módszereknek.

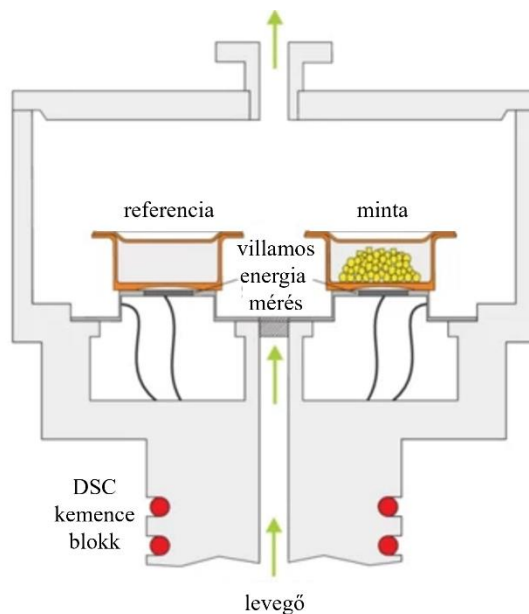
A TGA berendezés megméri egy minta tömegváltozását, miközben a minta környezetének hőmérsékletét jól definiált lépésekben szabályozza. A TGA mérlegek pontossága általában 0,1 mikrogramm [14].

A DSC belsejében két mérőcella található, mindkettő elektromosan fűtött. Mindkét cellán levegő/egyéb gáz áramlik keresztül, mellyel a ϕ beállítása is történik. A DSC méréssel termodinamikai folyamatok entalpiaviszonyára lehet következtetni, ugyanis az elektromos fűtés révén lehetőség van mindkét cella fűtéséhez szükséges villamos energia mennyiségének mérésére [11].

Az alapelv, hogy az egyik cellába a mintát helyezik, a másik cella pedig a referencia lesz, amit többnyire üresen hagynak (csak levegő van benne). A mérés során mindkét mérőcellát a kívánt hőmérsékletre melegítik, melyhez szükséges villamos energiát mindkét cella esetében külön mérik. A mintát tartalmazó cellában lejátszódik a folyamat (termikus degradáció, ad- illetve deszorpció, kémiai reakció), melyek lehetnek exotermek vagy endotermek. Exoterm esetben a mintacella felfűtéséhez kevesebb villamos energia szükséges, mint a referencia cellához, endoterm esetben pedig több. A két energia különbsége megadja a termodinamikai folyamat entalpiaváltozását.

A TGA és a DSC kombinálható, így az adszorpciót, illetve a deszorpciót kísérő entalpia és tömegváltozás is rögzíthető, melyből a szorpciós izoterma és az adszorpciós hő is meghatározható.

A deszorpciós izoterma pontjai is meghatározhatók ezzel a berendezéssel. A mintatartóba helyezik a teljesen száraz mintát, majd a minta tömegéhez képest jelentősen több vizet csepegtetnek a felszínére úgy, hogy az ellepje a szilárd anyagot. A mintatartót ezután a mérőcellába helyezik, majd a kívánt hőmérsékletre melegítik. A tömegcsökkenést folyamatosan monitorozzák addig, amíg be nem áll egy állandó érték. Fontos, hogy a minta fölé öntött víz mennyisége jóval meghaladja a szilárd minta által megkötött víz mennyiségét [11].



3. ábra DSC berendezés vázlata [15]

3.2.4. A MÓDSZEREK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

Az előzőekben taglalt módszereket foglalja össze a következő táblázat:

1. Táblázat Szorpciós izoterma mérési módszerek összehasonlítása ([11] nyomán)

	Statikus gravimetria	DVS	DSC
egyensúly áll-e be?	igen	igen	nem
alacsony diffúziós együttható esetén	nem használható	használható	használható
mérés ideje	hosszú (napok)	rövid(órák)	rövid(órák)
emberi beavatkozás	rendszeres	nem szükséges	nem szükséges
berendezés ára	olcsó	drága	drága

4. MÉRŐÁLLOMÁS TERVEZÉS ÉS MEGÉPÍTÉS

4.1. Előzmények

A TDK dolgozatom fő témája a szorpciós izoterma mérésére alkalmas berendezés tervezése és megépítése, mely projekt tanszéki előzményeit ebben az alfejezetben fogom tárgyalni. Amikor én becsatlakoztam a projektbe, akkor a tanszéken már több diplomamunka készült a témában, illetve a témavezetőm cikket is jelentetett már meg melyben fermentációs maradék statikus gravimetriás mérését végezte el [5].

Adott volt továbbá egy Julabo TW20 vízfürdő, melyről a fénykép a 3. ábrán látható. Ezen 0,1°C-os pontossággal beállítható a fürdő hőmérséklete 20-99°-os intervallumban, melyhez a felfűtést a fürdő aljzatán található elektromos fűtőszál biztosítja. A fürdő víztérfogata ~20 l, anyaga rozsdamentes acél. A fürdő zárható fedéllel rendelkezik, hogy a termosztált közeg elpárolgását csökkenti. Adott továbbá egy rácsos lemez is, melyet a fürdő aljzata fölé lehet rögzíteni, hogy ha egy tárgyat a vízbe merítünk, az ne érintkezzen a fenéken található fűtőszállal.



4. ábra Julabo TW20 vízfürdő a Tanszéken

Az én feladatomban az volt, hogy ennek a már meglévő fürdőnek a felhasználásával tervezzek, majd építsek meg egy szorpciós izoterma mérésére alkalmas berendezést.

Mint említettem, a témavezetőm Dr. Poós Tibor a múltban már írt cikket a témában és ő is egy hasonló vízfürdőt használt, amire egy gravimetriás elven működő mérőberendezést épített. Itt a fürdőbe befűtőszálak merültek, melyekbe a minta került és amelyekben a relatív nedvességtartalom beállítására különböző koncentrációjú kénsav oldatokat használt, amivel megfelelően pontos eredményeket ért el.

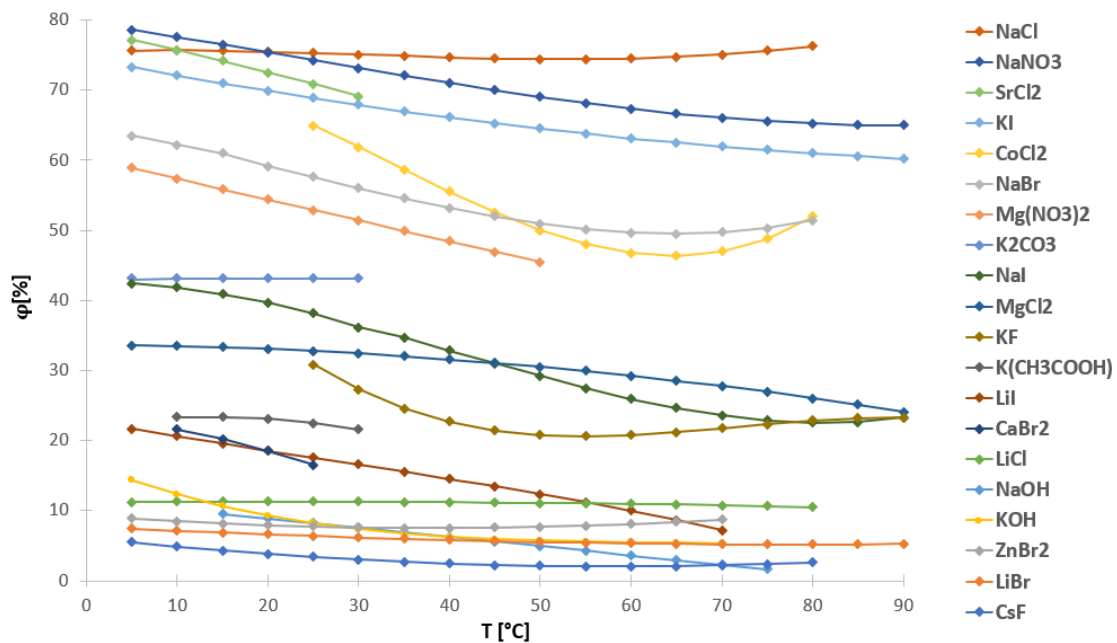
A problémát a főleg kénsav korrozív tulajdonsága okozta, mely a befőttesüvegek kupakját tönkretette, illetve azok a nehezekek is a korrózió áldozatául estek, melyek a fürdőbe való lesüllyedést tették lehetővé.

A kénsavval további problémák is felmerültek. Deszorpciós méréskor a mintában lévő nedvességtartalom elpárolog, mely utána gőztérből a kénsavoldatba kondenzál, ezzel hígítva azt. A kénsav standard esetén a pontos φ -t a kénsav koncentrációjával lehet megadni, viszont itt a deszorpciós mérés során a mintából oldatba kerülő nedvesség ezt hígította, így az mérési pontatlanságot eredményezett. Ezt a hatást ugyan figyelembe vette a kiértékelés során, viszont ez megnehezítette a számításokat. A hígulás problémáját szerette volna Szőke Botond is kiküszöbölni a diplomamunkája során. Ő irodalmi adatok alapján telített sóoldatokkal állította volna be a φ értékét az egyes üvegekben. Én is ezt a megoldást választottam, ennek részleteit a következő fejezetben tárgyalom.

4.2. Sók kiválasztása

Mint említettem, korábbi tapasztalatok alapján célszerűnek tűnt a relatív nedvességtartalmat szervetlen sók telített oldatával beállítani, hiszen ezek felett a φ értéke különböző hőmérsékleteken jól ismert, kimért adat, mely szakirodalomban megtalálható. A sók kevésbé veszélyesek, illetve az a tény, hogy itt nem egy bizonyos koncentrációt kell beállítani, hanem telített oldatot kell készíteni, jobban reprodukálhatóvá teszi a mérést. Amennyiben a telítéshez szükséges sómennyiségnél többet alkalmazunk, akkor a már feloldódni nem tudó mennyiség az edény alján szilárd formában visszamarad. Ha belekondenzálódó nedvesség hígítaná az oldatot, akkor újabb szilárd részecskék oldódnak fel, az oldatot telítetten tartva. A szakirodalomban megtalálható sók néhány kivételtől eltekintve egészségre nem ártalmasak, viszont a beszerzési költségük jelentősen eltérő, akadnak nagyon olcsók és meglehetősen drágák is.

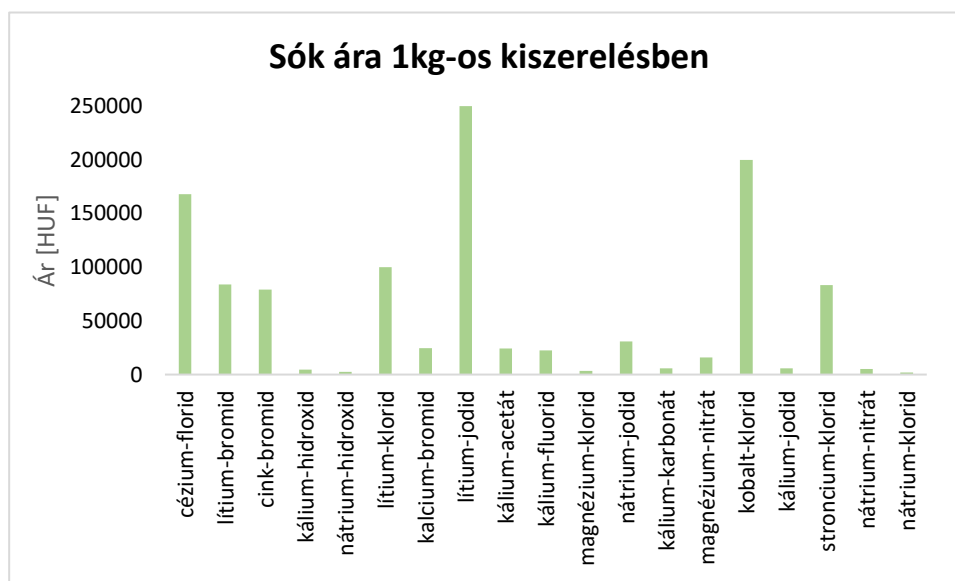
Különböző folyóirat cikkekben összefoglalva megtalálhatók T- φ táblázatok az egyes telített sóoldatokra, melyekből én készítettem egy összefoglaló táblázatot, majd abból egy diagramot, mely a 5. ábrán látható. Erre azért volt szükség, mert ezek közül ki kellett választani azokat a vegyületeket, amiket a tanszék ténylegesen beszerez. Szerettünk volna ugyanis egy mérés során minél több relatív nedvességtartalomnál tudjunk mérést végezni egy adott hőmérsékleten, hogy a matematikai modellekkel minél pontosabban közelítsük az adott izotermát. Kigyűjtöttem az egyes sók fizikai-kémiai tulajdonságait, az anyagok veszélyes jellemzőit is. Továbbá megkerestem ezeket Magyarországon is forgalmazó vegyszerboltokban és kigyűjtöttem, hogy 1 kg-ot mennyiért lehet beszerezni az adott anyagból.



5. ábra T - φ kapcsolat különböző szervesetlen sók esetében [8]

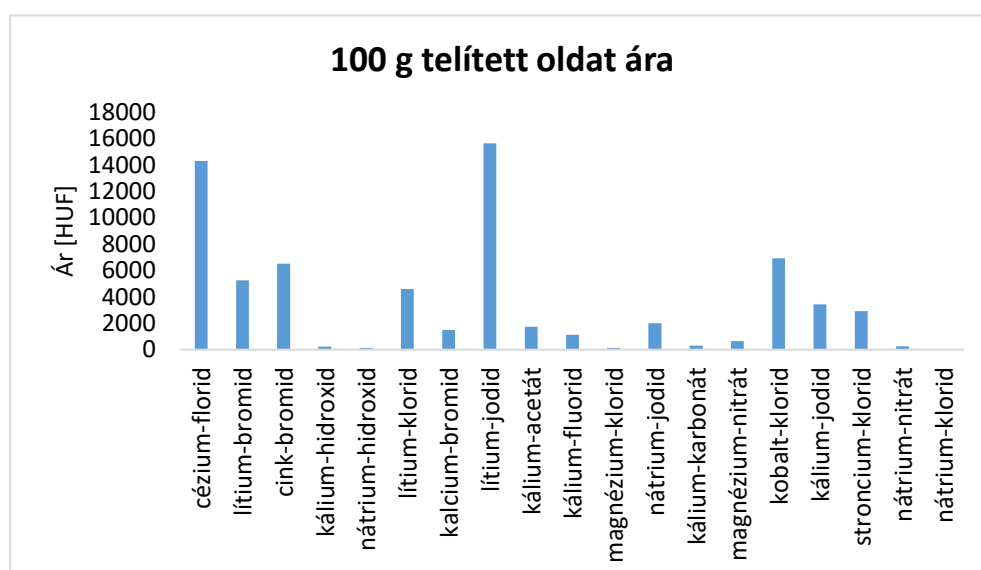
A fent említett vegyületek közül első sorban az árakat figyelembe véve kellett kiválasztanom, hogy melyiket fogom a későbbi mérésekhez alkalmazni. Szem előtt kellett tartanom továbbá, hogy a 0%-és 100% relatív nedvességtartalom között minél több helyen tudjunk mérni. Különös tekintettel a 0-15% és a 70-100% közti tartományra, mert ezeknél a φ értékeknél az izoterma meredeksége hirtelen változik, itt a pontos eredmények érdekében megéri sok, egymástól csak kicsit eltérő mérési pontot felvenni.

Az összes só ára 1 kg-ra vonatkozhatva látható az 6. ábrán.



6. ábra Szervesetlen sók ára 1 kg-os kiszerelésben (2023.május)

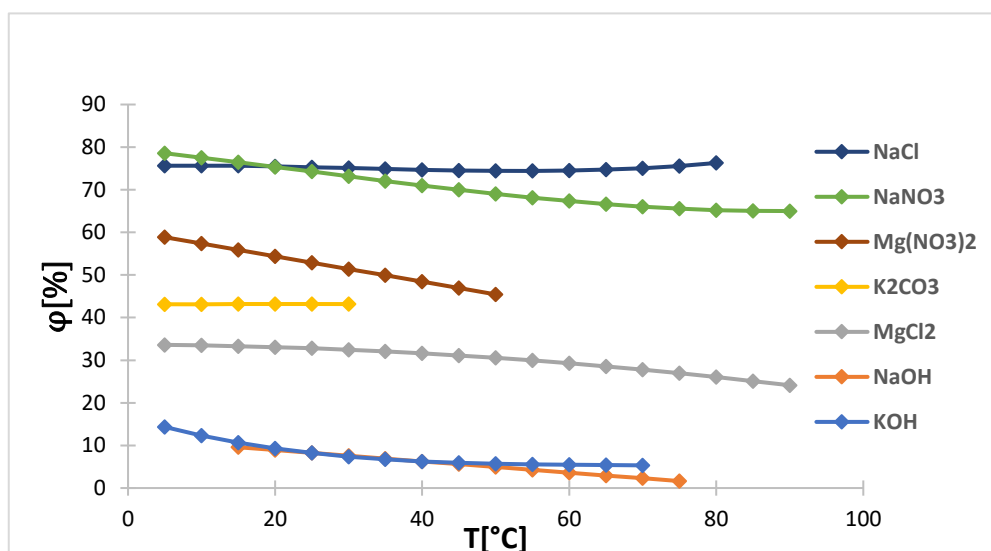
A diagramon látszik, hogy 1.800 és 250.000 Ft között mozognak az árak. Viszont nem elég csak az árat figyelembe venni, muszáj volt az oldhatósággal is foglalkoznom. Hiszen telített oldatot szerettem volna készíteni, nem mindegy, hogy ehhez melyik sóból mekkora tömegre van szükség. Elképzelhető, hogy egy valamivel olcsóbb sóból jelentősen többet kell felhasználni, mint egy drágábból, emiatt 100 g telített oldatot készíteni mégis abból a sóból lesz olcsóbb, aminek az egységára magasabb. Ennek szemléltetésére készítettem a 7. ábrán látható diagramot, mely 100 g standard oldat elkészítésének az anyagköltségét mutatja minden só esetében, szobahőmérsékleten.



7. ábra 100 g 25 °C-on telített oldat ára különböző szervesetlen sókból (2023 május)

A fenti megfontolások mellett a biztonságot is figyelembe kell venni. Ilyen okokból kerülendő például a KF használata, hiszen ennek oldata marja az üveget. Körültekintést igényel továbbá a KOH-al és a NaOH-al való munka, hiszen mindkettő erős bázis. Figyelni kell az olyan sók oldatának elkészítésekor is, amelyeknél nagy negatív elegyedési entalpia figyelhető meg, hiszen az oldódáskor nagy hőfejlődés várható, ami robbanásszerű forráshoz vezethet.

A fenti megfontolások alapján a kiválasztott sók a 8. ábrán láthatók.



8. ábra A kiválasztott sók T-φ diagramja

4.3. Szárítás

A szárítás kulcsfontosságú lépés egy szilárd anyag nedvességtartalmának meghatározásakor. Mind adszorpciós, mind deszorpciós mérés során ez a mérés befejező lépése, illetve adszorpciós esetben a kiinduló is.

A legfontosabb cél ebben a lépésben az összes kötött víz eltávolítása a mintából, hogy megkapjuk a száraz tömeget, amiből a későbbiek folyamán a minta nedvességtartalma számítható. Ha egy anyag adott hőmérsékleten és relatív nedvességtartalom mellett nem változtatja a tömegét az idő előrehaladtával, akkor beállt az egyensúly és az anyag vízzel telítettnek mondható. Ilyenkor elkezdhető a szárítási lépés, ahol kontrollált keretek között ez a nedvességtartalom eltávolítható.

Első lépésben erre egy szárítószekrényt használtunk, melyet 110°C-ra melegítettünk fel. Ebbe helyeztük a mintát minimum 24 órára, mely alatt az adszorbeált víz nagy része elpárolog a felületéről.

Második lépésként egy ekszikkátorba tesszük a mintát szobahőmérsékleten és légköri nyomáson. Szárítószerként mi CaCl_2 -t alkalmazunk, melyet előzetesen szintén szárítószekrényben készítettünk elő. A minták tömegét itt is rendszeresen mérjük, hogy lássuk, mikor lesz állandó a tömeg. Ha az egyensúly beállt, lemérjük a végső tömeget.

4.4. Az edény

A só standardok kiválasztásával párhuzamosan találnom kellett a befőttesüvegeknél alkalmasabb oldattartó edényeket, melyeket a vízfürdőbe merítve a mérés elvégezhető.

Az oldattartó edénnyel kapcsolatban a következő követelményeket támasztottam:

- ~140°C-ig hőálló
- hermetikusan zárható
- tartósan ellenáll a korrózióknak
- átlátszó
- egy páratérben lehessen elhelyezni a mintát és az oldatot anélkül, hogy közvetlenül érintkeznének
- könnyen beszerezhető
- olcsó

Szőke Botond már előttem megpróbálkozott ezzel, ő a Mepal Lunchpot Ellipse fantázianevű ételdobozzal tervezte volna ezt megoldani. Ennek a műanyag ételhordónak az alsó, nagyobb rekeszébe helyezte volna az oldatot, a kupak rekeszébe, ahova az ételhez való salátát/müzlit lehetne rakni, oda tervezte volna elhelyezni a mérendő anyagot. A minta és az oldat légtere közötti érintkezést furatok tették volna lehetővé. A 8 db doboznak egy leszorító keretet tervezett, mely egyrészt összefogta volna az edényeket, másrészt az önsúlyával a vízfürdőbe merülést tette volna lehetővé.

Én ennek a diplomatervnek az alapján kezdtem meg a keresgélést, mert tetszett az ételhordó doboz koncepciója. Viszont a kolléga konstrukciójának hátrányait szerettem volna kiküszöbölni. Ugyanis az általa megtalált doboz nem átlátszó, továbbá véleményem szerint annak polipropilén alapú műanyag falban lévő lágyítók/színanyagok/egyéb adalékok az agresszív, esetlegesen lúgos oldatoktól (pl. tömény KOH) kioldódhatnak, mely a mérést befolyásolná, esetlegesen használhatatlanná tenné az edényt. További hátrány volt az említett doboz ára is, hiszen 1 db nagyjából 6000 Ft-ba kerül (2023. szept.). A választott edényből pedig többre van szükség, mert egyszerre több φ értéknél is szerettünk volna mérni.

Én hosszas keresgélés után az IKEA bútoráruház kínálatában megtalálható DAGKLAR üvegedényt (9. ábra) választottam, mely kiküszöböli az előbb említett hátrányokat.



9. ábra Oldattartó edényként használt DAGKLAR üvegedény fotója és 3D modellje

A koncepció hasonló, rendelkezésre áll egy 400 ml térfogatú, hengeres üveg, melynek a szájába egy korrózióálló acélból készült kosár helyezhető, ahova „rendeltetészerű használat” esetén az üvegben tárolt joghurthoz való müzli/gyümölcs kerülhet. Én az üveg részbe terveztem a standard oldatot elhelyezni, a felső acél részbe pedig a mérendő szilárd anyag kerül majd, mely egy szilikon tömítés segítségével ül fel az üveg szájában. A légterek érintkeztetése az acél mintatartó oldalán vágott bordázaton keresztül lehetséges.

Az egészet felülről tömített kupakkal lehet lezárni, mely szintén korrózióálló acélból készül. Mivel maga az edény üvegből készült, ezért az elméletileg kémiailag ellenálló a hidrogén-fluoridon kívül minden anyagnak. Átlátszó, ezért az esetleges szennyeződések, falon történő vízgőz kondenzáció látható. Kisebb is, ezért a 4. 6. fejezetben leírtak szerint 15 üveg is belefér a vízfürdőbe a kolléga terveiben szereplő 8 helyett. Továbbá az általam talált üveg csak 2000 forintba kerül (2023. szeptember).

A következő megoldandó probléma az volt, hogy az edény miként fog a vízbe merülni. Gondoltam mágneses rögzítésre, de a vízfürdő korrózióálló acél fenéke nem mágnesezhető, ezért ez nem működik. Az is egyértelmű volt, hogy semmi olyan rögzítés nem jöhet szóba, mely a vízfürdőt bármilyen formában roncsolná (pl. csavar). A kolléga által tervezett leszorító keretes megoldás pedig bonyolult volt, túl sok alkatrész legyártását kívánta volna.

A legegyszerűbb megoldásnak az tűnt számomra, hogy rögzítsünk valamilyen nehezéket az üveghez, melynek hatására a test átlagos sűrűsége az 1000 kg/m^3 -at meghaladja, így le tud süllyedni. Az ehhez szükséges plusz tömeg becslését az alábbi alfejezetben ismertetem.

4.5. A nehezék

4.5.1. SZÜKSÉGES NEHEZÉK TÖMEGÉNEK BECSLÉSE

m_{glass} : mintatartó üveg tömege [kg]

m_{sol} : standard oldat tömege [kg]

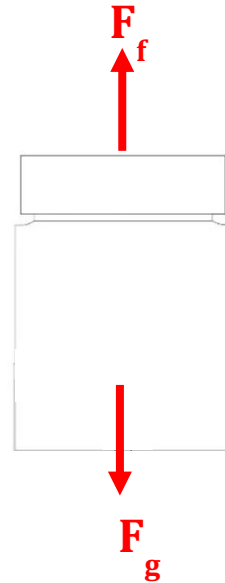
m_{weight} : nehezék tömege [kg]

g : gravitációs gyorsulás (9,81 [m/s²])

V_{glass} : oldattartó üveg térfogata [m³]

ρ_{H_2O} : víz sűrűsége [kg/m³]

V_{sol} : A standard oldat térfogata



Elhanyagolások:

- Minta tömege
- Az üvegbe zárt levegő tömege
- A nehezék térfogata, amennyiben az edényen kívül kerül rögzítésre
- A felhasználandó ragasztó tömege

10. ábra Az oldattartó üveg sematikus rajza és a rá ható erők

A számítás célja: 1000 kg/m³-nál nagyobb átlagos sűrűség elérése, hogy az edény lent maradjon. Annak érdekében, hogy a fenti elhanyagolások jogosak legyenek, a cél átlagsűrűséget 2000 kg/m³-nak választottam.

A súlyerő:

$$F_g = (m_{glass} + m_{sol} + m_{weight})g \quad (1)$$

A felhajtóerő:

$$F_f = \rho_{H_2O} V_{glass} g \quad (2)$$

A célunk a m_{weight} nehezék tömegének megválasztása úgy, hogy a súlyerő nagyobb legyen a felhatóerőnél, így a mintatartó üveg lesüllyed. A határesetben $F_g = F_f$, így:

$$(m_{glass} + m_{sol} + m_{weight})g = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot V_{glass}$$

$$m_{glass} + m_{sol} + m_{weight} = \rho_{H2O} \cdot V_{glass}$$

$$m_{weight} = \rho_{H2O} V - m_{glass} - m_{sol}$$

(3)

Az oldat tömegét kiszámíthatjuk a térfogatából és a sűrűségéből, melyet a tiszta víz sűrűségével közelítünk. Ezzel a közelítéssel a kisebb tömeg, tehát a biztonság irányába tévedünk és a számításokat is nagyon leegyszerűsíti.

$$m_{sol} = V_{sol} \cdot \rho_{H2O}$$

(4)

Tegyük fel, hogy 1 deciliter standard oldatot használunk. Ennyi minimum kell, hogy az egyensúly beállása után is biztosan maradjon belőle, illetve az edényben is bőven elfér ennyi folyadék.

$$m_{sol} = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,1 kg$$

Az üveg tömege, mérés alapján:

$$m_{glass} = 0,29 kg$$

A mintatartó pontos térfogatát lehetne számolni a geometriából is, de az üvegnek több helyen is változik az átmérője, illetve lekerekítéseket is tartalmaz. Ezért pontosabb a térfogat kiszorításos módszer. Egy átlátszó falú edényt mérlegre helyeztem és töltöttem bele annyi vizet, hogy behelyezve az üveget ellepje. Ekkor letaráztam a mérleget, majd az edényt levettem róla. Ezután behelyeztem a mintatartót és egy vékony tárggyal a víz alá nyomtam, amitől megemelkedett a víz szintje. Ezt a szintet megjelöltem, majd a mintatartó eltávolítása után eddig a jelig feltöltöttem vízzel. Visszatettem a mérlegre és ismét leolvastam a tömeget.

A második alkalommal hozzátöltött víz térfogata egyenlő a mintatartó térfogatával. A tömegből térfogat a következő módon számítható:

$$V_{glass} = \frac{m_{H2O}}{\rho_{H2O}} = \frac{0,505 kg}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 5,05 \cdot 10^{-4} m^3 = \mathbf{505 cm^3}$$

(5)

Ezek alapján a mintatartó edény átlagos sűrűsége felírható a következőképpen, ahol m_{weight} a rögzítendő nehezék tömege:

$$\rho_{glass} = \frac{m_{sol} + m_{glass} + m_{weight}}{V_{glass}}$$

(6)

Azt szeretnénk, hogy a mintatartó edény átlagos sűrűsége legalább 2000 kg/m^3 legyen, ehhez ki kell számolni a rögzítendő nehezék tömegét. A fenti egyenletet m_n -re rendezzük:

$$m_n = \overline{\rho_{glass}} \cdot V_{glass} - m_{sol} - m_{glass}$$

Ebben az egyenletben az egyetlen ismeretlen az m_{weight} , ezért annak értéke számszerűen meghatározható:

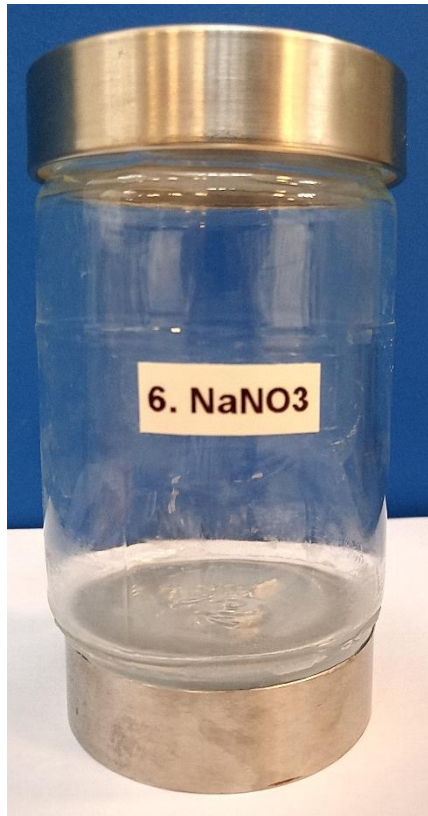
$$m_{weight} = 2000 \frac{kg}{m^3} \cdot 5,05 \cdot 10^{-4} m^3 - 0,1 \text{ kg} - 0,29 \text{ kg} = \mathbf{0,62 \text{ kg}}$$

A becslésem alapján 15 db, 75 mm átmérőjű, ~600 g tömegű korrózióálló acélkorongot gyártatott a Témavezetőm.

4.5.2. A NEHEZÉK RÖGZÍTÉSE

A következő kérdés az volt, hogy a nehezéket az üveg belsejébe tegyem, vagy erősítsem fel a külsejére. A belsejébe tenni egyszerűbb lett volna, mert nem kellett volna a rögzítésről gondoskodnunk. Viszont az üveg szájának átmérője kisebb, mint a fenekének az átmérője, így egy kisebb átmérőjű nehezék a fenéken elcsúszna, esetlegesen megrepesztené az üveget. Illetve ebben az esetben közvetlenül, állandóan érintkezne a korrózív sóoldattal, mely idővel valószínűsíthetően még a korrózióálló acélt is kikezdené. Emiatt a súlyt az üveg külsején terveztem rögzíteni.

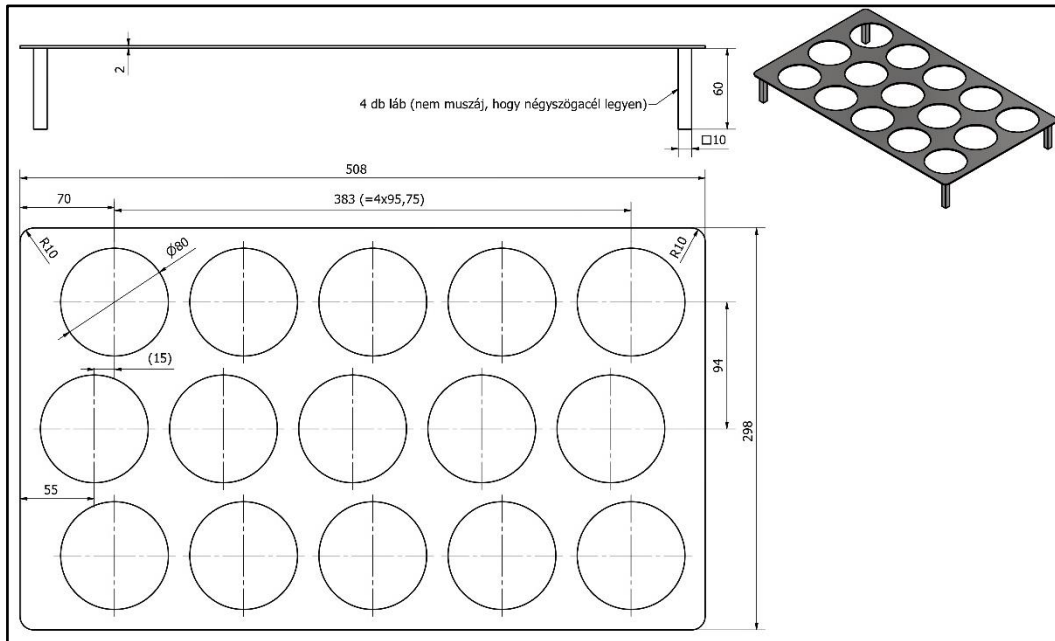
Ezután meg kellett vizsgálnom, hogy az oldattartó edény tetejére vagy az aljára célszerűbb rögzíteni a nehezéket. A stabilitás azt kívánta, hogy a súlyt az aljára rögzítsem, mert ha kupakra tettem volna, nagyon magasan lett volna a súlypont és a fürdőből való kiemeléskor az edény elfordult volna, ami a minta és a standard oldat közvetlen érintkezését eredményezhette volna. Az üveg fenekére a korrózióálló acél korongot szilikon ragasztóval ragasztottam fel, hogy a vizes közegben is szilárd maradjon a kötés.



11. ábra Oldattartó üveg a ráragasztott nehezéssel

4.6. Az edények száma és az elválasztó lemez

Mivel szerettünk volna minél több pontot kimérni egy adott hőmérsékleten (izotermán), ezért szükséges volt a rendelkezésre álló vízfürdőbe minél több üveget anélkül elhelyezni, hogy azok összeérnének. Ehhez egy olyan elválasztó lemezre volt szükség, melyet vízszintesen a fürdőbe süllyeszthetünk, hogy az üvegeket egymástól egyenlő távolságra tartsa. Ennél a részfeladatnál nagy segítségemre volt kolléga, aki korábban ezzel foglalkozott, hiszen ő a vízfürdőt már lemodellezte Autodesk Inventor szoftverben, mely modelleket én is felhasználtam. Nehézség volt számomra, hogy nekem semmiféle előismeretem nem volt az Inventorral kapcsolatban, teljesen az alapoktól kellett megtanulnom a szoftver kezelését. Ezzel terveztem meg az említett elválasztó lemezt, melybe végül 15 db üveg fér bele. A rögzítésre először én kampós füleket terveztem, amik a fürdő szélén akadtak volna meg, így tartva lemezt. A témavezetőm javaslatára ezeket lábakra cseréltem, melyek alulról támasztják meg a lemezt. A korrózióálló acélból legyártott lemez műszaki rajza a 12. ábrán, az elkészült lemez pedig a 13. ábrán látható.



12. ábra Az elválasztó lemez műszaki rajza



13. ábra Az elkészült elválasztó lemez

4.7. A mintatartó kosár

A kosarak elkészítésénél nagy segítségemre volt egy francia szakmai gyakorlatos hallgató is, aki 2023. nyarán nyáron néhány hetet a tanszéken töltött.

Az oldattartó üvegbe lógó acél mintatartón egy bordázat kialakítására volt szükség, mely lehetővé teszi a minta és a sóoldat légtere közötti keveredést. Ehhez a hengerpaláston 3x2 vágást ejtettünk, egymástól a hengerpaláston egyenlő távolságra, azaz 120° -ként kettőt, ahogy

az a 11. ábrán is látszik. A vágást sarokköszörűvel végeztük, majd a vágások szélén visszamaradt sorját tűreszelővel és csiszolópapírral távolítottuk el. Ezt mind a 15 mintatartó esetében elvégeztük, majd fel is políroztuk a felületet. A vágásokat összeszámolva látható, hogy összesen $15 \times 6 = 90$ vágást kellett feljelölnünk, kivágnunk, majd kézzel megtisztítanunk, mely sok munkaórát igénybe vett.



14. ábra Mintatartó kosár félkész, illetve befejezett állapotban

4.8. Mintatartó üvegek

Magába a kosárba nem lehet beletenni a mintát, mert a bordázaton keresztül a sóoldatba esnének a szemcsék, illetve azt nem is lenne lehetséges a tömegmérés idejére hermetikusan lezárni. Ezért minden kosáron belül egy kis üveg elhelyezésére van szükség, melynek a táratömegét minden vizsgálat előtt lemérjük és amibe majd a mintát fogjuk tenni. A mintát ebben az üvegben át lehet tenni a szárítószekrénybe, illetve ekszikkátorba, így minimalizálható a műveletek közbeni esetleges kiszóródás esélye. Mintatartó üvegek élelmiszerek tárolására használt, kereskedelmi forgalomban kapható 30 ml térfogatú befőttesüvegeket választottam.



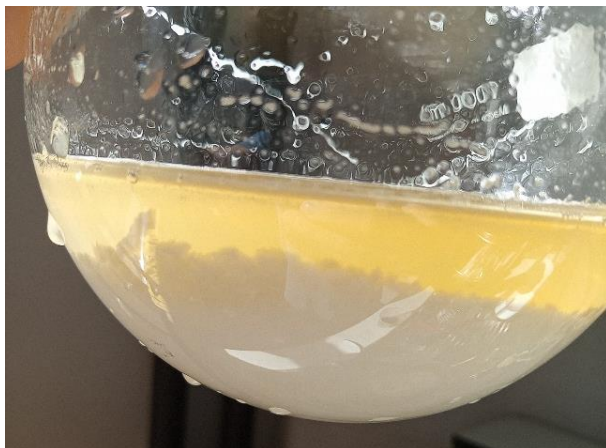
15. ábra Mintatartó üveg

4.9. A mérőállomás összeszerelése

A mérés megkezdéséhez szükség volt a telített standard sóoldatok elkészítésére. Ehhez 50 cm^3 ioncserélt vizet töltöttem 7 db edénybe, és mindegyikbe addig adagoltam a kiválasztott 7 só egyikét, ameddig szobahőmérsékleten telített nem lett. A két erős bázis (NaOH, KOH) oldásakor körültekintően kellett eljárni, mert ezen vegyületek oldódása exoterm folyamat és az esetlegesen kifröccsenő erősen lúgos oldat égési sebeket okoz. Emiatt a későbbiekben is, amikor ezekkel az anyagokkal dolgoztam, mindig köpenyt, gumikesztyűt és védőszemüveget viseltem.

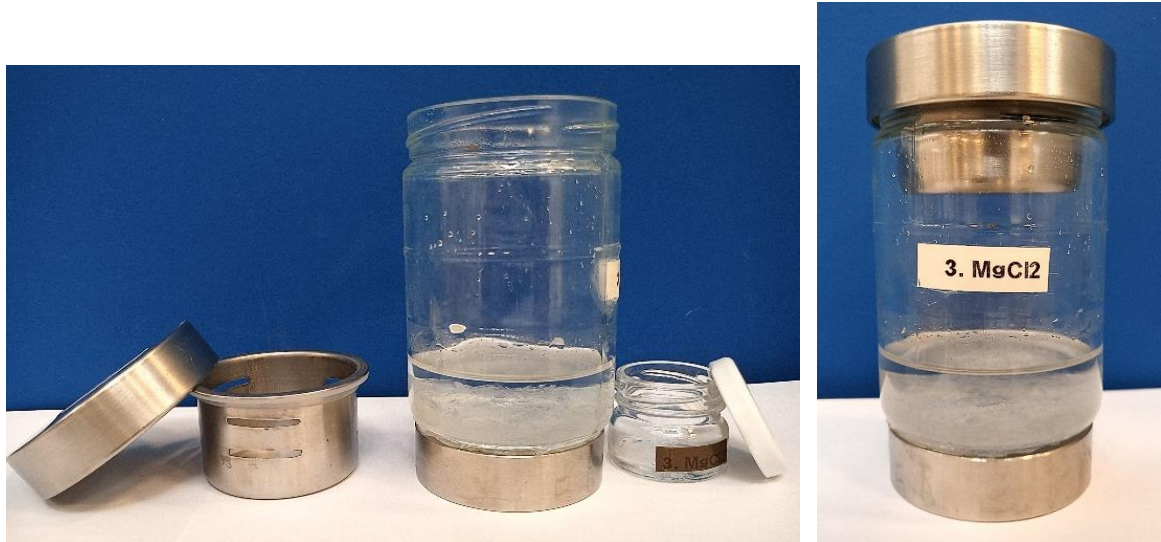
Amikor a szobahőmérsékleten telített oldatok elkészültek, 70°C -os vízfürdőbe helyeztem őket és megvártam, amíg temperálódnak. Ezután addig adagoltam az egyes sókat a már meglévő oldatokhoz, amíg 70°C -on is telítettek nem lettek. Ezután egy pipetta és egy Griffin-labda segítségével minden oldatot „duplikáltam”, azaz a térfogat felét átpipettáztam egy üres üvegbe, így minden sóoldatból kettő üvegbe került, ami összesen 14 üveget jelent. Így összesen 7 φ értéknél lehet 2-2 mintát mérni. A pipettázás után az oldatokat vízfürdőből kivéve hagytam visszahűlni, mely szilárd kristályok kiválását eredményezték az edény alján. Ha esetlegesen a mintából többlet víz kerülne a rendszerbe, akkor ezek a kristályok a részleges beoldódásukkal gondoskodnak arról, hogy az oldat telített maradjon és ne változzon az edényen belül a levegő relatív nedvességtartalma.

A sók kapcsán meg kell említenem, hogy a NaNO_3 -at csak szennyezett formában sikerült beszerezni, az anyagból készült oldat sárgásbarna színű volt egy, a vízben szintén oldódó szennyező miatt. A mérés pontossága érdekében a sót vízből történő átkristályosítással tisztítottam. A 16. ábrán a hűtés során forró, szennyezett oldatból kiváló fehér NaNO_3 kristályok láthatók.



16. ábra NaNO_3 átkristályosítása

Az üvegek feliratozására is szükség volt, hogy tudjuk, hogy melyikben milyen standard oldat van. Feliratok kerültek az oldattartó üvegre, illetve a kupakjára, továbbá a mintatartó üvegekre és a kupakjára is



17. ábra A méréshez szükséges mintatartó kosár, oldattartó üveg és mintatartó üveg egymás mellett, illetve összeszerelve



18. ábra Az összeszerelt mérőállomás, benne a 14 üveggel

4.10. Mérés menete

Adszorpciós mérés esetén először a mérendő anyagot szárítószekrényben, legalább 24 óráig kiszárítjuk. A mérés előtt ioncserélt vízzel feltöltjük a vízfürdőt és beállítjuk rajta a kívánt hőmérsékletet.

Minden mintatartó üvegnek megmérjük a tömegét saját kupakjával együtt, ez lesz a tára tömege az egyes esetekben. Ezután a mintatartókba mérünk annyi mérendő szemcsés anyagot, hogy azok félig legyenek. Ezután a mintatartó kosarakba helyezzük az üvegeket, melyek az oldattartó üvegekbe kerülnek.



19. ábra A minta a behelyezése

Ezután minden oldattartó üveget lezárunk a saját kupakjával, majd egyesével az előkészített vízfürdőbe helyezzük őket. A minták tömegeit lehetőleg naponta megmérjük, ehhez az oldattartó üvegeket a vízből egy speciális fogó segítségével kivesszük, majd szárazra töröljük. Lecsavarjuk a kupakját, majd amilyen gyorsan csak lehet, a kis mintatartó üvegre tesszük annak saját kupakját, hogy a labor levegője ne változtassa számottevően a mintában kialakult egyensúlyt. Lemérjük a tömegét, majd az imént leírt folyamatot megismételjük visszafelé. Ezt érdemes naponta megtenni minden üveg esetében, a mért tömegeket pedig feljegyezni. Amennyiben további változás nem tapasztalható a tömegekben az előző naphoz képest, az egyensúly beállt és a mért tömeg és a táratömeg különbsége megadja a nedves anyag tömegét (m_{wp})

$$m_{wp} = m_{w,total} - m_{tare}$$

(7)

A mintatartó üvegeket ezután szárítószekrénybe helyezzük 24 órára, majd ismét megmérjük a tömegüket, nem megfélekezve az egyes üvegek kupakjáról, hiszen a tára tömegbe az is beletartozik.

$$m_{dp} = m_{d,total} - m_{tare} \tag{8}$$

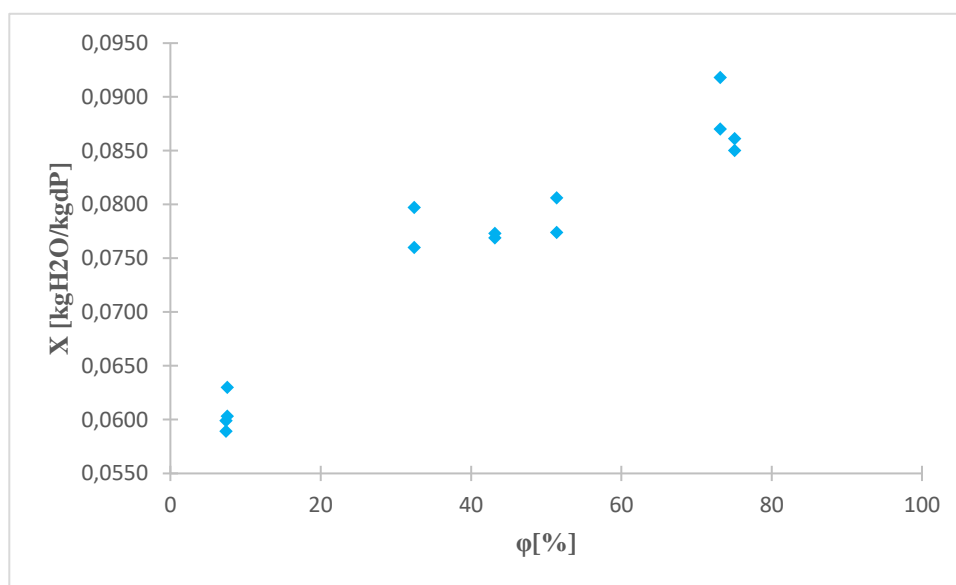
A nedvességtartalmat (X) a száraz tömegre vonatkoztatva kapjuk meg:

$$X = \frac{m_{wp} - m_{dp}}{m_{dp}} \tag{9}$$

A derékszögű koordinátarendszer y tengelyén a kisminta szárazanyagra vonatkoztatott nedvességtartalom értékeket ábrázolva, az x tengelyen pedig a φ értékeket minden egyes minta esetében, kirajzolódnak a szorpciós izoterma pontjai.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

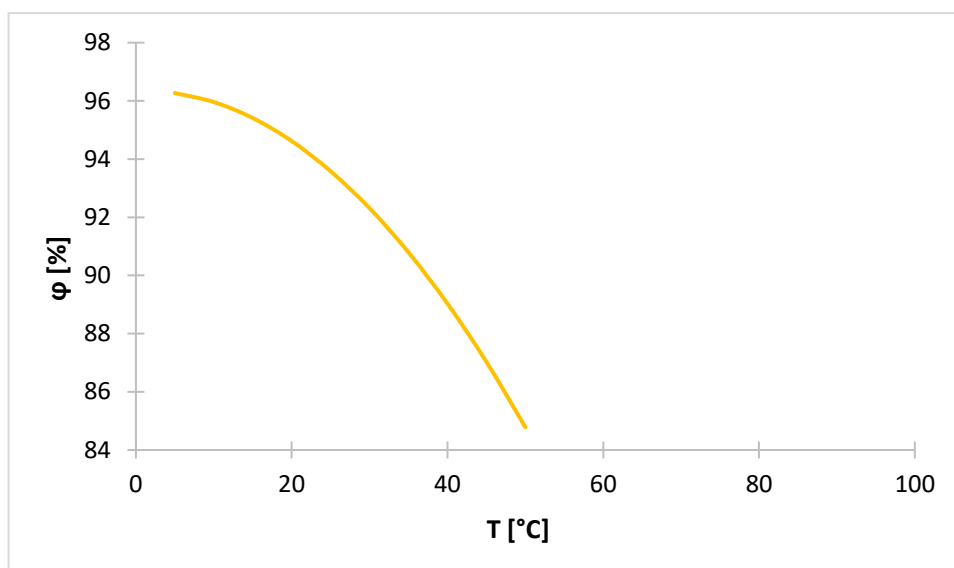
A Tanszéken egy már folyamatban lévő projektbe bekapcsolódva, a már meglévő terveket új ötletekkel és alkatrészekkel kiegészítve készítettem el a tárgyalt mérőállomást. A munkát siker koronázta, hiszen a berendezésen egy próbamérést végeztem, mely során egy zeolit adszorbenst vizsgáltam 30 °C-on. A mérés során kapott szorpciós izoterma pontjait mutatja a 20. ábra.



20. ábra A zeoliton végzett próbamérés adataiból kirajzolt szorpciós izoterma

Az ábrán látható mérési pontokra lehetséges a rendelkezésre álló adszorpciós modellekkel különböző görbéket illeszteni, melyre a kutatás későbbi fázisában kerül majd sor. Az első próbamérésből leszűrt tanulságok a következők:

A KOH és a NaOH oldat relatív nedvességtartalom értéke nagyon közel van egymáshoz, ezért későbbiekben csak a KOH-val fogunk dolgozni. A NaOH-ról munka közben kiderült, hogy nagy koncentráció esetén kis mértékben megtámadja az oldattartó edény üvegét, ezért is került elvetésre. A felszabaduló két üvegben KNO₃ telített oldatát fogjuk használni, mely fölött a ϕ értéke 90% környéki.



21. ábra Kálium-nitrát telített oldata feletti relatív nedvességtartalom a hőmérséklet függvényében [8]

Ez azért lesz hasznos, mert akkor szélesebb tartományban lesznek mérési pontjaink, így még pontosabb lesz a későbbiekben esedékes görbeillesztés.

Összesítésben elmondható, hogy a mérőállomás jól működik, a feladat elején kitűzött célt sikerült elérnem.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] „memoireonline.com,” [Online]. Available: https://www.memoireonline.com/02/16/9434/m_Determination-des-isothermes-de-sorption-adsorption-desorption-cas-de-l-aubergine-solanum-mel6.html.
- [2] G. A. K. M. K. M. László Krisztina, Fizikai kémia I. kémiai termodinamika, Typotex, 2012.
- [3] R. L. M. C. E. P. C. Ricardo D. Andrade P., „Models of sorption isotherms for food: uses and limitations,” *Vitae*, 1. kötet3, 1. szám18, pp. 325-334, 2011.
- [4] G. A. Collazos-Escobar, „Modelling of water sorption isotherm of dehydrated coffee beans using machine learning techniques,” in *European Drying Conference*, Łódź, Poland, 2023.
- [5] V. S. Tibor Poós, „Desorption isotherms and isosteric heat of anaerobic fermentation residues,” *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 1. kötet10, 1. szám27, pp. 2510-251, 2019.
- [6] M. & M. A. & M. Z. & K. M. Karoglou, „Water Sorption Isotherms of Some Building Materials,” *Drying Technology*, 1. szám23, pp. 289-303, 2005.
- [7] A. L. E. K. I. A. K. M. B. F. & E. H. Y. Fantasse, „Fantasse, A., Lakhal, E. K., Idlimam, A., Kouhila, M., Berroug, F., & El Haloui, Y. (2020). Management of hydroxide sludge waste using hygroscopic gravimetric method and physico-chemical characterization,” *Materials Today*, 1. szám27, 2020.
- [8] L. Greenspan, „Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions,” *J Res Natl Bur Stand A Phys Chem.*, 1. kötet1, 1. szám81A, pp. 89-96, 1977.
- [9] B. C. D. C. Remington C, „Measurement and Modelling of Moisture Sorption Isotherm and Heat of Sorption of Fresh Feces,” *Water*, 1. kötet2, 1. szám12, p. 323, 2020.
- [10] P. T. Punit Singh, „Determination of thermophysical and desorption properties of elephant foot yam using composition based and fast sorption method,” *Thermal Science and Engineering Progress*, 1. szám18, p. 100508, 2020.
- [11] E. R. J. F. S. C. & D. L. P. Arlabosse, „Comparison Between Static and Dynamic Methods for Sorption Isotherm Measurements,” *Drying Technology*, 1. kötet3, 1. szám21, pp. 479-497, 2003.
- [12] „proumid.com,” [Online]. Available: <https://proumid.com/en/dynamic-vapor-sorption/>.
- [13] „hidenisochema.com,” 2018. [Online]. Available: <https://hidenisochema.com/news-press/dynamic-vapor-sorption-technique/>.

- [14] „particletechlabs.com,” [Online]. Available: <https://particletechlabs.com/ptl-press/what-is-the-difference-between-thermogravimetric-analysis-tga-and-differential-scanning-calorimetry-dsc/>.
- [15] „netsch.com,” [Online]. Available: <https://analyzing-testing.netsch.com/en/products/differential-scanning-calorimeter-dsc-differential-thermal-analyzer-dta>.
- [16] J.-P. G. L. C. S. S. V. B. M. K. G. Limousin, „Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement,” *Applied Geochemistry*, 1. kötet, 1. szám, pp. 249-275, 2007.