

JOULE THOMSON EFFEKTUS MEGOLDÁSA GÁZNYOMÁS SZABÁLYOZÓ ÁLLOMÁSOKNÁL

SOLUTION OF JOULE THOMSON EFFECT FOR GAS PRESSURE REGULATOR STATIONS

Angadi Basettappa Vishalakshi*, Bencs Péter**

ABSTRACT

In this research, a mathematical overview of the industrial treatment of the Joule Thomson effect is presented. The solutions will be used to solve industrial problems. The problem is mainly related to heating solutions for pressure reducing stations. Here, we will apply the mathematical relationships given to calculate the cooling of pressure reducing valves. By applying these relations, numerical simulation is performed to properly map the operation.

1. BEVEZETÉS

Joule-Thomson-effektus, más néven Joule-Kelvin-effektus, a gáz expanziójával járó hőmérsékletváltozás, amely nem jár munkával vagy hőátadással. Közöséges hőmérsékleten és nyomáson a hidrogén és a hélium kivételével minden valódi gáz lehül ilyen expanzió esetén; ezt a jelenséget gyakran használják ki a gázok cseppfolyósításánál. A jelenséget 1852-ben James Prescott Joule és William Thomson (Lord Kelvin) brit fizikusok vizsgálták. A lehülés azért következik be, mert munkát kell végezni a gázmolekulák közötti nagy hatótávolságú vonzás leküzdéséhez, amikor a molekulák egymástól távolodnak. A hidrogén és a hélium csak akkor hűl le expanzió esetén, ha a kiindulási hőmérsékletük nagyon alacsony, mert ezekben a gázokban a nagy hatótávolságú erők szokatlanul gyengék [1].

A termodinamikában a Joule-Thomson-effektus (más néven Joule-Kelvin-hatás vagy Kelvin-Joule-effektus) egy valós gáz vagy folyadék hőmérsékletváltozását írja le (megkülönböztetve az ideális gáztól), amikor azt egy szelepen vagy porózus dugón keresztül kényszerítjük, miközben szigetelve tartjuk, hogy ne történjen hőcsere a környezettel. Ezt az eljárást fojtási folyamatnak vagy Joule-Thomson-folyamatnak nevezik. Szobahőmérsékleten a hidrogén, a hélium és a neon kivételével minden gáz lehül a Joule-Thomson-folyamat által okozott expanziókor, amikor egy nyíláson keresztül fojtják; ez a három gáz hasonlóan viselkedik, de csak alacsonyabb hőmérsékleten. A legtöbb folyadékot, például a hidraulikus olajokat a Joule-Thomson-féle fojtási folyamat felmelegíti.

A gázhűtéses fojtási folyamatot általában a hűtési folyamatokban, például a levegő szétválasztására szolgáló ipari folyamatok cseppfolyósítóiban használják ki. A hidraulikában a Joule-Thomson-féle fojtásból származó

melegítő hatás felhasználható a belsőleg szivárgó szelepek felkutatására, mivel ezek hőt termelnek, ami termoelemmel vagy hőkamerával kimutatható. A fojtás alapvetően irreverzibilis folyamat. A tápvezetékek, hőcserélők, regenerátorok és a (hő)gépek egyéb alkatrészeinek áramlási ellenállásából eredő fojtás a teljesítményüket korlátozó veszteségek forrása.

A hatás James Prescott Joule és William Thomson, után kapta nevét, akik 1852-ben felfedezték. Joule korábbi, a Joule-expanzióval kapcsolatos munkája nyomán jött létre, amely szerint egy gáz vákuumban szabad expanzió megy keresztül, és a hőmérséklet nem változik, ha a gáz ideális.

Egy gáz adiabatikus (hőcsere nélküli) expanziója többféleképpen is végrehajtható. Az expanzió során a gáz által tapasztalt hőmérsékletváltozás nemcsak a kezdeti és a végső nyomástól, hanem az expanzió végrehajtásának módjától is függ.

- Amennyiben az expanziós folyamat reverzibilis, azaz a gáz mindenkor termodinamikai egyensúlyban van, akkor izentróp expanzióról beszélünk. Ebben az esetben a gáz az expanzió során pozitív munkát végez, és hőmérséklete csökken.

- Szabad expanzió esetén viszont a gáz nem végez munkát és nem vesz fel hőt, így a belső energia megmarad. Ilyen módon expandáltatva egy ideális gáz hőmérséklete állandó maradna, de egy valódi gáz hőmérséklete csökken, kivéve nagyon magas hőmérsékleten [2].

- Ebben a cikkben tárgyalt expanziós módszert, amely során a P_1 nyomáson lévő gáz vagy folyadék a kinetikus energia jelentős változása nélkül áramlik egy alacsonyabb P_2 nyomáson lévő területre, Joule-Thomson-expanzióknak nevezzük. Az expanzió eredendően irreverzibilis. Az expanzió során az entalpia változatlan marad (lásd a bizonyítást alább). A szabad expanzióval ellentétben munka történik, ami a belső energia változását okozza. Azt, hogy a belső energia nő vagy csökken, az határozza meg, hogy a folyadékon vagy a folyadék által végzett munka határozza meg; ezt az expanzió kezdeti és végső állapota és a folyadék tulajdonságai határozzák meg.

A Joule-Thomson-expanzió során bekövetkező hőmérséklet-változást a Joule-Thomson-együtthatóval számukerültsítjük (μ_{JT}). Ez az együttható lehet pozitív

*hallgató, **egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézet Tanszéke
email: *vishalavishu691@gmail.com, **peter.bencs@uni-miskolc.hu

(hűtésnek megfelelő) vagy negatív (melegedés). Az együtttható nagyon magas és nagyon alacsony hőmérsékleten egyaránt negatív; nagyon magas nyomáson minden hőmérsékleten negatív. A maximális inverziós hőmérséklet (621 K az N_2 esetében) a nulla nyomáshoz közeledve következik be. Az N_2 gáz esetében alacsony nyomáson, magas hőmérsékleten negatív, alacsony hőmérsékleten pozitív.

2. FIZIKAI MECHANIZMUS

Két tényező változtathatja meg a folyadék hőmérsékletét adiabatikus expanzió során: a belső energia változása vagy a potenciális és a kinetikus belső energia közötti átalakulás. A hőmérséklet a termikus kinetikus energia (a molekulák mozgásához kapcsolódó energia) mérőszáma; így a hőmérséklet változása a termikus kinetikus energia változását jelzi. A belső energia a termikus kinetikus energia és a termikus potenciális energia összege. Így, még ha a belső energia nem is változik, a hőmérséklet változhat a kinetikus és a potenciális energia közötti átalakulás miatt; ez történik a szabad expanzióban, és a folyadék expanzió során jellemzően hőmérsékletcsökkenést eredményez. Ha a folyadékon vagy a folyadék által az expanzió során munka történik, akkor a teljes belső energia változik. Ez történik a Joule-Thomson-expanzióban, és a szabad expanziónál megfigyeltnél nagyobb mértékű melegedést vagy lehűlést eredményezhet [3].

A Joule-Thomson-expanzióban az entalpia állandó marad. Az entalpia, H , a következőképpen van meghatározva

$$H = U + PV \quad (1)$$

Ahol U a hőenergia, P a nyomás és V a térfogat. A Joule-Thomson-expanzió feltételei mellett a PV változása a folyadék által végzett munkát jelenti. Ha a PV növekszik, miközben a H állandó, akkor az U -nak csökkennie kell, mivel a folyadék munkát végez a környezetében. Ez a hőmérséklet csökkenését eredményezi, és pozitív Joule-Thomson-együtthatót eredményez. Ezzel szemben a PV csökkenése azt jelenti, hogy a folyadékon munkát végeznek, és a belső energia nő. Ha a mozgási energia növekedése meghaladja a potenciális energia növekedését, akkor a folyadék hőmérséklete megnő, és a Joule-Thomson-együttható negatív lesz.

Ideális gáz esetén a PV nem változik a Joule-Thomson-tágulás során. Ennek következtében a belső energia nem változik; mivel a termikus potenciális energia sem változik, a termikus kinetikus energia sem változhat, és ezért a hőmérséklet sem változhat. Valódi gázokban a PV változik

A PV értékének és az azonos hőmérsékleten ideális gázra várható értéknek a hányadosát nevezzük összenyomhatósági tényezőnek, Z -nek. Egy gáz esetében ez alacsony hőmérsékleten általában kisebb, mint 1, magas hőmérsékleten pedig nagyobb, mint 1. Alacsony nyomáson a Z értéke mindig az egység felé mozog, ahogy a gáz tágul. Így alacsony hőmérsékleten a Z és a PV a gáz

tágulásával csökken; ha a csökkenés elég nagy, a Joule-Thomson-együttható negatív lesz.

2.1. A Joule-Thomson (Kelvin) együttható

A T hőmérséklet változásának sebessége a P nyomás függvényében egy Joule-Thomson-folyamatban (azaz állandó H entalpia mellett) a Joule-Thomson (Kelvin) együttható μ_{JT} . Ez az együttható a gáz V térfogata, állandó nyomáson mért hőkapacitása és hőtágulási együtthatója alapján a következőképpen fejezhető ki;

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = \frac{V}{C_p} (\alpha T - 1) \quad (2)$$

Az összefüggés bizonyítását lásd a Joule-Thomson-együttható származtatásánál. Az értéket általában $^{\circ}\text{C}/\text{bar}$ -ban (SI-egységek: K/Pa) fejezik ki, és a gáz típusától, valamint a gáz expanzió előtti hőmérsékletétől és nyomásától függ. Nyomásfüggése 100 bar nyomásig általában csak néhány százalékos. Minden valódi gáznak van egy inverziós pontja, ahol az értéke előjelet vált. Ennek a pontnak a hőmérséklete, a Joule-Thomson-inverziós hőmérséklet, a gáz tágulás előtti nyomásától függ.

Gáztágulás esetén a nyomás csökken, így a definíció szerint a ∂P előjele negatív. Ezt szem előtt tartva a következőekben megmagyarázzuk, hogy a Joule-Thomson-hatás mikor hűt vagy melegít egy valódi gázt:

1. Ha a gáz hőmérséklete \rightarrow az inverziós hőmérséklet alatt van \rightarrow akkor μ_{JT} pozitív \rightarrow mivel a ∂P mindig negatív \rightarrow így a ∂T negatív \rightarrow Tehát a gáz lehül.
2. Ha a gáz hőmérséklete \rightarrow az inverziós hőmérséklet felett van \rightarrow akkor μ_{JT} negatív \rightarrow mivel a ∂P mindig negatív \rightarrow így a ∂T pozitív \rightarrow Tehát a gáz melegszik.

A hélium és a hidrogén két olyan gáz, amelyek Joule-Thomson-inverziós hőmérséklete egy atmoszféra nyomáson nagyon alacsony (pl. a hélium esetében kb. 45 K, -228°C). Így a hélium és a hidrogén melegszik, ha állandó entalpiával, tipikus szobahőmérsékleten expanzióra kerül. Másrészt a nitrogén és az oxigén, a levegő két legnagyobb mennyiségben előforduló gázának inverziós hőmérséklete 621 K (348°C), illetve 764 K (491°C): ezek a gázok a Joule-Thomson-effektus révén szobahőmérsékletről lehűthetők. Ideális gáz esetén, mindig egyenlő nullával: az ideális gázok állandó entalpia mellett történő expanziójakor sem nem melegsznek, sem nem hűlnek [4].

2.2. Alkalmazások

A gyakorlatban a Joule-Thomson-effektust úgy érik el, hogy a gáznak egy fojtószerkezeten (általában egy szelepen) keresztül engedik expandálni, amelyet nagyon jól szigetelni kell, hogy megakadályozza a gázba vagy a gázból történő hőátadást. Az expanzió során a gázból nem vonnak ki külső munkát (a gáz nem expandálhat például turbinán keresztül).

A Joule-Thomson-féle tágulás során keletkező hűtés a hűtőtechnikában értékes eszközzé teszi a expanziót. A hatást a Linde-technikában szabványos eljárásként alkalmazzák a petrokémiai iparban, ahol a hűtőhatást a gázok cseppfolyósítására használják, valamint számos kriogén alkalmazásban (pl. folyékony oxigén, nitrogén és argon előállítására). Egy gáznak az inverziós hőmérséklete alatt kell lennie ahhoz, hogy a Linde-ciklus segítségével cseppfolyósítani lehessen. Ezért az egyszerű Linde-ciklusú cseppfolyósítók, amelyek a környezeti hőmérséklet-ről indulnak, nem használhatók hélium, hidrogén vagy neon cseppfolyósítására. A Joule-Thomson-effektus azonban még a hélium cseppfolyósítására is használható, feltéve, hogy a héliumgázt először 40 K inverziós hőmérséklete alá hűtjük [5].

2.3. A Joule-Thomson együttható származtatása

Nehéz fizikailag elgondolni, hogy mit jelent a Joule-Thomson együttható (μ_{JT}). Emellett a modern meghatározások nem a Joule és Thomson által használt eredeti módszert használják, hanem egy másik, szorosan kapcsolódó mennyiséget mérnek. Ezért hasznos, ha az alábbiakban leírtak szerint összefüggéseket vezetünk le más, kényelmesebben mérhető mennyiségek között.

Ezeknek az eredményeknek az eléréséhez az első lépés az, hogy a Joule-Thomson-együttható a három változót, T -t, P -t és H -t tartalmazza. A ciklikus szabály alkalmazásával azonnal hasznos eredményt kapunk; e három változóra vonatkoztatva a szabály a következőképpen írható le

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_H \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial H}\right)_T = -1. \quad (3)$$

Ebben a kifejezésben a három részleges derivált mindegyikének sajátos jelentése van. Az első az μ_{JT} , a második az állandó nyomású hőkapacitás, C_p , amelyet a következő módon határozunk meg

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P \quad (4)$$

a harmadik pedig az izotermikus Joule-Thomson-együttható fordítottja, μ_{JT} , amelyet a következő módon határozunk meg

$$\mu_{JT} = -\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T. \quad (5)$$

Ez utóbbi mennyiség könnyebben mérhető, mint az μ_{JT} . Így a ciklikus szabályból származó kifejezés a következő lesz

$$\mu_{JT} = -\left(\frac{\mu_{JT}}{C_p}\right). \quad (6)$$

Ez az egyenlet használható a Joule-Thomson-együttható kiszámításához a könnyebben mérhető izotermikus Joule-Thomson-együtthatóból. A következőkben a

Joule-Thomson-együttható matematikai kifejezésére használjuk a folyadék térfogati tulajdonságainak függvényében.

A továbblépéshez a kiindulópont az entalpiára vonatkozó termodinamikai alapegyenlet; ez a következő

$$\partial H = T dS + V dP. \quad (7)$$

Ha most a hőmérsékletet állandó értéken tartjuk, és "elosztjuk" a következővel dP :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T + V \quad (8)$$

A bal oldali parciális derivált az izotermikus Joule-Thomson-együttható, a jobb oldali pedig a Maxwell-összefüggésen keresztül a hőtágulási együtthatóval fejezhető ki (μ_{JT}). A megfelelő összefüggés a következő

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -V\alpha \quad (9)$$

Ahol α a hőtágulás köbös együtthatója. E két parciális derivált helyettesítésével a következő eredményt kapjuk

$$\mu_{JT} = -TV\alpha + V \quad (10)$$

Ez a kifejezés most már helyettesíthető a korábbi egyenletben a következőhöz:

Ez a Joule-Thomson-együttható (μ_{JT}) kifejezése az általánosan elérhető tulajdonságok, a hőkapacitás, a moláris térfogat és a hőtágulási együttható alapján. Megmutatja, hogy a Joule-Thomson-inverziós hőmérséklet, amelynél nulla, akkor következik be, ha a hőtágulási együttható egyenlő a hőmérséklet inverzével. Mivel ez minden hőmérsékleten igaz az ideális gázokra (lásd: tágulás gázokban), az ideális gáz Joule-Thomson-tényezője minden hőmérsékleten nulla [6].

2.4. Joule második törvénye

Könnyen ellenőrizhető, hogy egy megfelelő mikroszkopikus posztulátumokkal meghatározott ideális gáz esetében $\alpha T = 1$, tehát egy ilyen ideális gáz hőmérséklet-változása Joule-Thomson-tágulás esetén nulla. Egy ilyen ideális gáz esetében ez az elméleti eredmény azt jelenti, hogy:

A belső energia egy ideális gáz rögzített tömegének belső energiája csak a hőmérséklettől függ (a nyomástól vagy a térfogattól nem).

Ezt a szabályt eredetileg Joule találta meg kísérletileg valós gázokra, és Joule második törvénye néven ismert. A finomabb kísérletek jelentős eltéréseket találtak tőle.

2.5. Hűtés és légkondicionálás

A fojtás hatására a gáz nyomáscsökkenésen megy keresztül, és bizonyos körülmények között a hőmérséklete is csökken. A jelenséget Joule-Thomson-effektusnak nevezik, és a gáz hőmérsékletváltozásával jár együtt. Ha a

folyamat olyan hőmérséklet- és nyomástartományban zajlik, amely biztosítja, hogy a hatás pozitív legyen (a gáz hőmérséklete csökken a nyomás csökkenésével), akkor a fojtás a gáz lehűlését eredményezi, és sikeresen alkalmazható gázok cseppfolyósítására. A következő követelményeknek kell megfelelni:

- Az érintett gázoknak nagyon alacsony telítési hőmérséklettel és nyomással kell rendelkezniük.

- Ahhoz, hogy a gáz pozitív Joule-Thomson-effektussal jellemezhető állapotba kerüljön, előzetes előkészítésre van szükség: a gázt elő kell hűteni kiegészítő klaszikus hűtőrendszerekben.

- A nagyon alacsony hőmérsékletek eléréséhez nagyon nagy nyomásesések szükségesek.

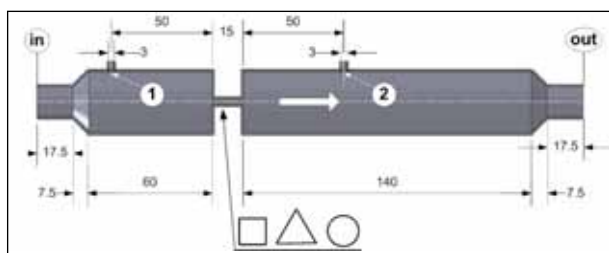
Például hidrogén esetében a fojtás előtti nyomásértéknek 190 K (kb. -83 °C) alatti előhűtés után 110 barral kell megegyeznie ahhoz, hogy pozitív Joule-Thomson-hatást érjünk el.

2.5. Dupla oszlopos kialakítás

A kétoszlopos nitrogén-visszavezetési eljárást az 1970-es évek végén fejlesztették ki. Az eljárást levegőválasztó üzemekben használják, és módosítható a nitrogén szénhidrogén-áramból történő frakcionálására. Ebben az eljárásban a nitrogént alacsony nyomáson, kriogén hőmérsékleten, jellemzően -310 °F-on választják el, ami megköveteli, hogy a betáplált gáz legfeljebb 40 ppm CO₂-t tartalmazzon, hogy a CO₂ ne fagyjon meg a kriogén oszlopban. Ez a rendszer kihasználja a tápgáz magas nitrogéntartalmát, hogy a kriogén oszlop visszaáramoltatásához a JT-effektus révén hűtést eredményezzen. Előnye az alacsony energiafogyasztás és az egyszerű konfiguráció, amely a levegő szétválasztó berendezés kialakításából származik. A levegőválasztó üzem tervezési koncepciójának földgázüzemekre történő adaptálásakor a tervezést úgy kell módosítani, hogy az üvegházhatású gázok kibocsátásának minimalizálása érdekében a nitrogénzellőzőben alacsony szénhidrogénszintet biztosítson.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott számítási eljárásokat alkalmazva kijelenthető, hogy jól számítható analitikai úton is a Joule-Thomson effektus különböző fojtási alakok esetén. Az 1. ábra mutatja az elemezni kívánt számítási modellt, melyen jól látható az elhelyezett fojtási hely és formák [7].



1. ábra. A számítási modell geometriája.

A számítások elvégzéséhez az AVL FIRE M szoftvert fogjuk használni. A számításokat a szoftverben beépített hőtechnikai modellek alkalmazásával fogjuk elvégezni. A jövőbeni kutatási feladatok folytatásaként különböző nyomások esetén fogjuk meghatározni a különböző nyomáscsökkenő elemek hatásait.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

The author is grateful to the AVL Company for the technical (software academic license) support of this research.

A szerzők köszönetüket fejezik ki az AVL cégnek a kutatás technikai támogatásért (akadémiai szoftver license).

5. IRODALOM

- [1] Allison, T. C., & Simons Eugene, S. (2022). Impacts of Hydrogen Transport in Pipelines.
- [2] Blokland, H., Sweelssen, J., Isaac, T., & Boersma, A. (2021). Detecting hydrogen concentrations during admixing hydrogen in natural gas grids. International Journal of Hydrogen Energy, 46(63), 32318–32330. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.221>
- [3] Brower, M., Petersen, E. L., Metcalfe, W., Curran, H. J., Füri, M., Bourque, G., Aluri, N., & Güthe, F. (2013). Ignition Delay Time and Laminar Flame Speed Calculations for Natural Gas/Hydrogen Blends at Elevated Pressures. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 135(2). <https://doi.org/10.1115/1.4007763>
- [4] Frank, E. D., Elgowainy, A., Reddi, K., & Bafana, A. (2021). Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from hydrogen delivery: A cost-guided analysis. International Journal of Hydrogen Energy, 46(43), 22670–22683. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.078>
- [5] Grigoriev, S. A., & Fateev, V. N. (2017). Hydrogen Production by Water Electrolysis. In Hydrogen Production Technologies (pp. 231–276). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119283676.ch6>
- [6] Mohammad, B. S., McManus, K., Brand, A., Elkady, A. M., & Cuppoletti, D. (2020, September 21). Hydrogen Enrichment Impact on Gas Turbine Combustion Characteristics. Volume 4B: Combustion, Fuels, and Emissions. <https://doi.org/10.1115/GT2020-15294>
- [7] Ono, H., Fujiwara, H., Onoue, K., & Nishimura, S. (2019). Influence of repetitions of the high-pressure hydrogen gas exposure on the internal damage quantity of high-density polyethylene evaluated by transmitted light digital image. International Journal of Hydrogen Energy, 44(41), 23303–23319. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.035>