



HŐRE LÁGYULÓ POLIMEREK FRÖCCSÖNTÉSI ÜREG- NYOMÁSÁNAK MÉRÉSÉRE ALKALMAS BERENDEZÉS TERVEZÉSE

DESIGN OF A CAVITY PRESSURE MONITORING SYSTEM FOR PLASTIC INJECTION MOLDING

Keresztes Kristóf,¹ Gergely Attila Levente²

¹ Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia. keresztos.kristof@student.ms.sapiientia.ro

² Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia. agergely@ms.sapiientia.ro

Abstract

This work aims to create an instrument that allows the measurement of cavity pressure during plastic injection molding. The designed device is intended to contribute to the equipment inventory of the Polymer Technology Laboratory at Sapiientia EMTE, Faculty Târgu Mureș. The design criteria were the ease of mounting and use. The system was implemented with two load cells, two HX711 amplifiers, an ESP32-based microcontroller and a corresponding computer user interface. The user interface was developed using National Instruments LabVIEW program and finalized as a stand-alone application. During the design steps, attention was also paid to the practical applicability of the system.

Keywords: injection molding, cavity pressure, microcontroller, LabVIEW, load cell.

Összefoglalás

A dolgozat célja egy eszköz létrehozása, amely lehetővé teszi az üregnyomás mérését műanyag fröccsöntés közben. A tervezett berendezés a Sapiientia EMTE Marosvásárhelyi Karának polimertechnológiai laboratóriuma eszközkészletét hivatott bővíteni. A tervezés során a fő hangsúly az egyszerű felhasználhatóságot biztosító kivitelezésre esett. A berendezés két erőmérő cellával, két HX711 erősítővel, egy ESP32-alapú mikrovezérlővel, illetve az ezekhez tartozó számítógépes felhasználói felülettel lett megvalósítva. A felhasználói felület a National Instruments LabVIEW programjával lett elkészítve, majd egy különálló alkalmazásként véglegesítve. A tervezési lépések során figyelem fordult a berendezés gyakorlati alkalmazhatóságára is.

Kulcsszavak: fröccsöntés, üregnyomás, mikrovezérlő, LabVIEW, erőmérő cella.

1. Bevezetés

A XXI. században a polimerek gyártástechnológiájában bekövetkező fejlődésnek köszönhetően a műanyagok egyre elterjedtebbek mindennapi életünkben. Az autóiparban különösen érezhető ez a változás, ahol a polimerek alacsony sűrűségük, gazdaságos előállíthatóságuk és kiváló tulajdonságaik miatt egyre inkább felváltják a hagyományos fém alkatrészeket. Az iparágban tapasztalható rohamos növekedés azt mutatja, hogy a polimerek feldolgozása ma már az egyik

legjelentősebb iparág, így a gyártásellenőrzés és annak digitalizálása elengedhetetlen.

1.1. A fröccsöntés alapjai

A fröccsöntés alapelve az alacsony viszkozitású műanyagömladék befecskendezése zárt szerzőmba, amely szűk járatokon (csatornákon) keresztül történik. A szerszám gyors és teljes kitöltéséhez elengedhetetlen a kis viszkozitás. A teljes kitöltést a magas fröccsöntőnyomás is elősegíti. A fröccsöntési folyamat természetéből adódóan

az ömledék lehűlése viszonylag rövid idő alatt alatt megtörténik, illetve a folyamat kiváló méretpontosságú végterméket eredményez. Emellett előnyt jelent, hogy a fröccsöntés lehetővé teszi bonyolult formájú alkatrészek készítését, amelyek nem igényelnek további megmunkálást, kivéve a vezetékcsatornákban megdermedt műanyag eltávolítását. A fröccsöntési technológia alkalmazásával akár nagy tömegű alkatrészek (>50 kg) gyártása is megvalósítható, megfelelően nagy fröccsöntő berendezéssel [1].

1.2. A mikrovezérlők alapjai

A mikrovezérlők kis méretű, digitális jelek feldolgozására és beágyazott rendszerek vezérlésére specializálódott önálló számítógépek. Alapvető fontosságúak ipari automatizálásban, háztartási eszközökben, járművekben, orvosi berendezésekben stb. Ezen mikroprocesszorok egy chipen integrálják a CPU-t, az operatív memóriát és a perifériás eszközöket, kis helyet foglalnak el, alacsony energiafogyasztásúak és gazdaságosan gyárthatók nagy mennyiségben.

A mikrovezérlők programozhatók, fejlesztők, saját szoftvert hozhatnak létre alkalmazásaikhoz, testre szabott megoldásokat készíthetnek. A perifériák mint az analóg-digitális átalakítók (ADC), a digitális-analóg átalakítók (DAC), az időzítők és a kommunikációs interfészek lehetővé teszik a külvilággal való kommunikációt és az inputok-outputok kezelését.

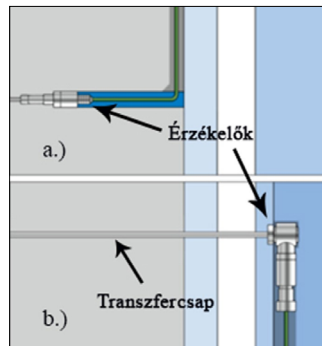
Elérhetők különböző architektúrákban és teljesítményszinteken. A programozáshoz speciális fejlesztői eszközökre vagy fejlesztői lapokra van szükség. Ezek tartalmazzák a mikrovezérlő programozásához szükséges alkatrészeket a [2].

1.3. A fröccsöntési üregnyomás mérése

Az üregnyomás fröccsöntés közbeni mérésének lehetősége rendkívül hasznos. Az erőmérő cellák szerepe egy ismert összefüggés létrehozása az érzékelőkre ható erő és az általa kibocsátott jel között. Erőmérő cellák esetében ez a kapcsolat nagy mérési tartományban lineáris, így a kalibrálásuk egyszerű. Az iparban nyomásmérő cellák mellett elterjedten használnak piezoelektromos vagy piezorezisztív érzékelőket is.

A nyomásmérő rendszereket két fő kategóriába lehet sorolni az általuk alkalmazott érzékelési módszer alapján: direkt és indirekt módszer (1. ábra).

A direkt módszer egyszerűbb kivitelezésű, mivel nem alkalmaz transzfercsapot, viszont pontatlanabb eredményeket ad, több karbantartást követel, és nagy figyelmet igényel az érzékelők kiválasz-



1. ábra. a.) Direkt és b.) indirekt (transzfercsapos) nyomásmérési módszer [3]

tásánál. Az indirekt módszer egy transzfercsapot alkalmazva továbbítja a fröccsöntési nyomásból származó erőt az érzékelőnek, ami lehetővé teszi, hogy az érzékelő alacsonyabb hőmérsékleten működjön, mivel távolabb helyezkedik el a szerszámtől [3]. Mindkét módszer esetében az érzékelők feladata a nyomásból adódó erő időbeli változásának érzékelése.

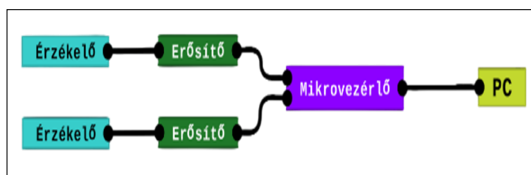
2. Célkitűzés

A kutatásom célja egy, a hőre lágyuló műanyagok fröccsöntési üregnyomásának mérésére alkalmas berendezés tervezése és kivitelezése. A berendezés a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem Marosvásárhelyi Karán a polimer technológia laboratórium eszközkészletét hivatott bővíteni. A berendezés célja az, hogy lehetővé tegye az üregben kialakuló nyomás időbeli változásának vizsgálatát, ábrázolását és a mérési adatok lementését.

3. A berendezés felépítése

A berendezést, felépítését (2. ábra) és működését tekintve, feloszthatjuk hardver- és szoftver-részre:

- hardver: érzékelők, erősítők, a mikrovezérlő és az ezeket összekötő vezetékek
- szoftver: az ESP32 mikrovezérlőn futó program, illetve a számítógépen (PC) a LabVIEW környezetben kifejlesztett felhasználói felület



2. ábra. A tervezett berendezés felépítési diagramja

4. Hardver

4.1. ESP32

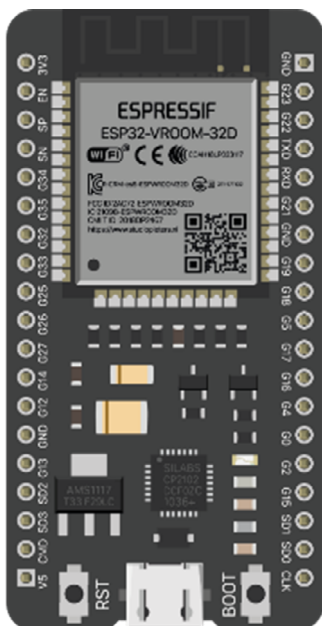
A projekthez kiválasztott fejlesztői lap egy ESP32-típusú mikrovezérlővel ellátott készülék (3. ábra). Számítási képességei célunkhoz kiválóak, illetve előnyt jelent a fizikai mérete is, amely segít a berendezés végső méretének csökkentésében.

A választott mikrovezérlő számos ADC-vel van ellátva. A projekt első fázisaiban megpróbáltuk ezeket felhasználni az érzékelők analóg jeleinek beolvasására, viszont felbontásuk igen kicsinek minősült ezen alkalmazáshoz, hiszen ez csak 12 bit. Továbbá, a mikrovezérlőn található ADC-k linearitása messze nem tökéletes, és befolyásolta volna a tervezett berendezés méréseinek hitelességét. Ezekből az okokból adódóan egy külső, 24 bites ADC-vel ellátott erősítő áramkört iktatunk be az érzékelők és a mikrovezérlő közé.

Mivel az erősítők és a mikrovezérlő között szinkronsoros kommunikációval történik az adatátvitel, a betápláláson kívül 4 db digitális bemenet volt alkalmazva. Ezekből 2 db az adatnak, illetve 2 db az órajelnek (taktusnak).

4.2. RC15-5 erőmérő cellák

A használt érzékelők híd típusú erőmérő cellák, melyeket a CavityEye Kft. cégnek köszönhetjük, akik kutatásunk az érzékelők adományozásával támogatták.



3. ábra. ESP32 mikrovezérlő [4]

Az RC15-5 érzékelők (4. ábra) elnevezése a Ring Cell megnevezésből származik. A számok a külső átmérőre, illetve a maximális terhelhetőségre utalnak, melyek esetünkben 15 mm és 5 kN. Működési hőmérséklet-intervallumuk $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5].

Az érzékelők betáplálása 5–12 V feszültséggel történik, melynek hatására a kiadott jel a 10–20 mV tartományba esik. Az érzékelőkre ható erő és az általuk kibocsátott jel között lineáris összefüggés van, melyet leolvasva következtetni lehet a terhelőerő nagyságára.

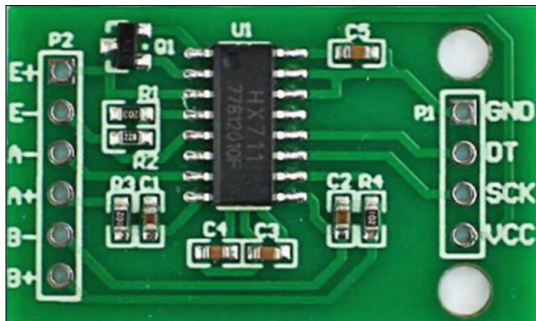
4.3. HX711 erősítők

Mivel az érzékelők által kibocsátott jel kis intenzitású, ennek kellő pontossággal történő mérése egy erősítőt igényel. A pontosan erre a célra kifejlesztett HX711 áramkör (5. ábra) műszererősítőt jelent alkalmazva kellően fel lehet erősíteni a jelet annak érdekében, hogy az hasznos eredményhez vezessen. Az erősítési szorzó értéke választható: 128, 64 vagy 32 (esetünkben 128). Emellett a HX711 áramkör rendelkezik egy ADC-vel, melynek felbontása 24 bit.

A HX711 betáplálási feszültségintervalluma 2.6–5.5 V. Az áramkörön található tápegység-szabályozónak köszönhetően betáplálható mind a mikrovezérlő 3.3 V, mind az 5 V (VIN) feszültségű lábáról, mely alkalmazását tovább egyszerűsíti [6].



4. ábra. RC15-5-típusú erőmérő cella (5000 N)



5. ábra. HX711-típusú erősítő áramkör

4.4. 3D nyomtatott ház

Mivel nem ajánlott, hogy az elektromos alkatrészeket csupán a vezetékek tartsák össze, 3D-nyomtatástechnológiával elkészült egy rekeszes tárolóegység, (6. ábra) mely biztosítja a hardverelemek megfelelő tárolását és biztonságos használatát.

5. Szoftver

A mikrovezérlő programjának megírására az Arduino fejlesztői környezet volt használva (Arduino IDE), míg a számítógépes felhasználói felület LabVIEW környezetben volt elkészítve.

5.1. Mintavételezési idő meghatározása

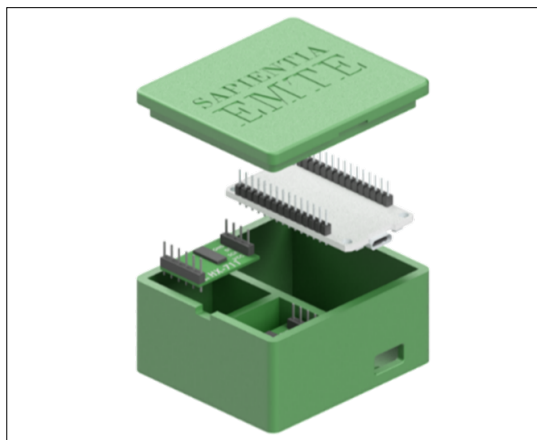
Annak érdekében, hogy a LabVIEW környezetben fejlesztett programot optimalizálni lehessen, szükséges volt megbecsülni a mikrovezérlő program fő ciklusának lefutásához szükséges időt.

A program ciklusának lefutási ideje, mely egyben a mintavételezési periódust is jelenti, egy tesztprogrammal volt meghatározva. Ez nem csak a mintavételezéshez szükséges parancsokat, hanem az idő mérésére szükséges kódrészletet is tartalmazza.

5.2. Érzékelők kalibrálása

A nyomásmérő cellák kalibrálásához egy külön program készült. Ennek szerepe az, hogy az érzékelőktől kapott jelekből származó digitalizált értéket kiírja. Ez az az érték, amelyet a HX711 ADC-je állít elő és küld a mikrovezérlőhöz.

A program mindkét szenzorról érkező nyers értéket kiírja a Serial Monitor (Arduino IDE) segítségével, melyet a felhasználó le tud olvasni.



6. ábra. Tárolótokmány és a belehelyezett alkatrészek

A kalibráció során több iterációban lejegyeztük az érzékelők kimeneteit:

- terheletlen állapotban,
- ismert terhelés mellett,
- 10 s terhelés után.

A 10 s utáni érték leolvasásának szerepe az érzékelők ún. „creep” hatásának minimalizálása, mely miatt konstans terhelés mellett az érzékelők által kibocsátott jel idővel csökken.

A kalibrálási mérések kiértékelése során megbizonyosodhattunk arról, hogy az érzékelők által kiadott jel és a rájuk ható erő közötti kapcsolat lineáritása megfelelő a mért tartományban. A regressziós együttható négyzete (R^2) 0.9997, illetve 0.9996 a két érzékelő esetében.

5.3. ESP32 program

A mérés során egyes aritmetikai műveleteket szükséges elvégezni annak érdekében, hogy az érzékelőktől kapott jelnek értelmet adhassunk. Ezen műveletek elvégzése kötelező, viszont az nem megszabott, hogy kötelezően a mikrovezérlő kell, hogy elvégezze. Az időigényesebb számítások terhéért előnyös levenni a mikrovezérlőről, így minimalizálhatjuk a mintavételezési periódust. A fenti okokból kifolyólag a 7. ábrán látható program került a mikrovezérlőre, amely az adatok regisztrálására alkalmas.

5.4. LabVIEW felhasználói felület

A LabVIEW program felhasználói felületnek (8. ábra) biztosítania kell a következő funkcionálisokat:

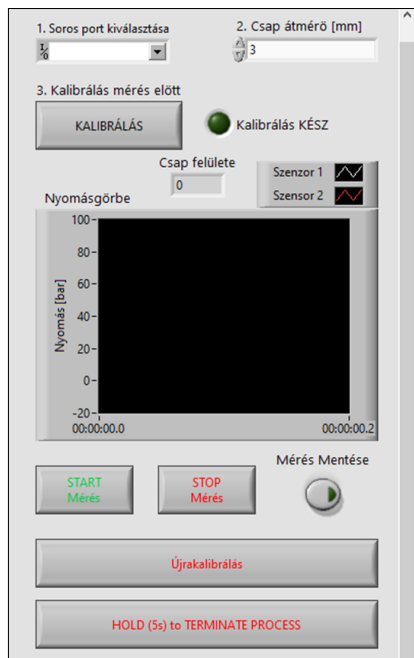
- soros kommunikációs port kiválasztása;
- transzfercsap átmérőjének megadása;
- kalibrálás indítása;
- a mérés megkezdése, illetve leállítása;
- adatok lementése;
- újrakalibrálás indítása.

A felhasználói felület tervezése során a kontrollok intuitív elhelyezésére került a hangsúly.

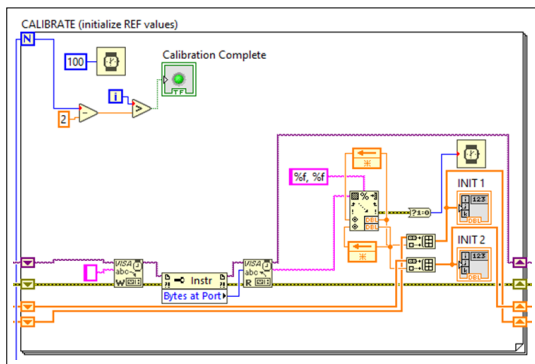
```
void loop() {
    if (scale1.is_ready() && scale2.is_ready()) {
        long rawValue1 = scale1.read();
        long rawValue2 = scale2.read();

        Serial.print(rawValue1);
        Serial.print(", ");
        Serial.println(rawValue2);
    }
}
```

7. ábra. Mintavételező program a HX711 könyvtár felhasználásával



8. ábra. A LabVIEW program felhasználói felülete



9. ábra. Kalibrálási ciklus LabVIEW grafikus felületen



10. ábra. Az összeszerelt berendezés a tárolókba helyezve

5.5. LabVIEW Block Diagram

A LabVIEW programfejlesztői környezet teljes mértékben grafikus. Ebben a felhasználónak lehetősége van a szokásos programozási struktúrák implementálására, mint például a while és for ciklus.

A LabVIEW programcsomagban megtalálható Virtual Instrument Software Architecture (VISA) protokollok segítségével volt megvalósítva a mikrokontroller és a PC közötti soros kommunikáció.

Az 5.3 fejezetben kifejtett okból kifolyólag a jelek feldolgozásához szükséges számítások a LabVIEW programmal voltak elvégezve.

A program fő ciklusának első lépése az erőmérő cellák referenciaértékének meghatározása (inicializálás) (9. ábra). Ez terheletlen érzékelőkkel kell, hogy történjen. Az inicializálás minden programindításkor automatikusan lefut, viszont manuálisan is elvégezhető (reinitializálás). Ez egy kimondottan hasznos funkciónak bizonyult már a program tesztelése során.

Ugyancsak a fő ciklusban történik a mintavételezés, illetve a szükséges aritmetikai műveletek elvégzése.

6. Berendezés összeszerelése

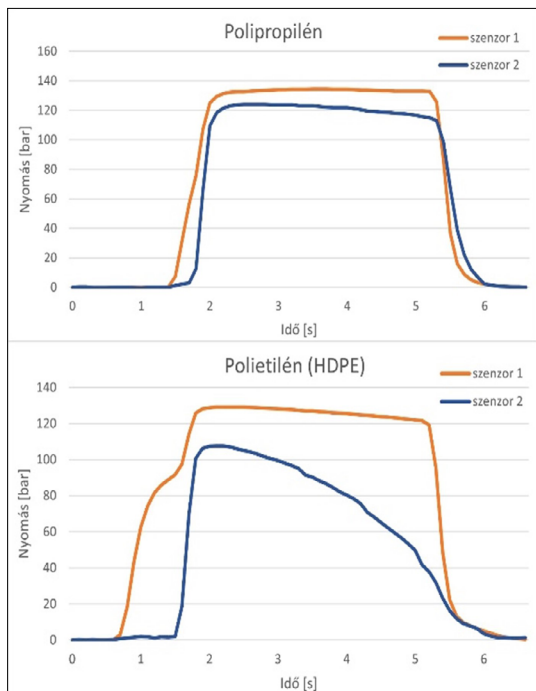
A berendezés elektromos komponenseinek összeszerelése az ezeken található lábak/pinek és vezetékek segítségével történt. A csatlakozások megvalósítása után az alkatrészeket behelyeztük a számukra készített 3D nyomtatott dobozba, amelyből a betáplálás és adatkommunikációs, illetve az érzékelők vezetékai ki vannak vezetve (10. ábra).

7. Mérési eredmények

A berendezést, alkalmazhatóságának tesztelése érdekében, üzembe helyeztük. Az indirekt nyomásmérő módszer (1.3. fejezet) elvei alapján elkészült fröccsöntő szerszámba szereltük az érzékelőket, majd a Sapientia EMTE polimer technológiai laboratóriumában próbaméréseket végeztünk. A fröccsöntés egy korábbi államvizsga-dolgozat keretén belül elkészült pneumatikus fröccsöntőgép segítségével történt.

A fröccsöntött alkatrészek szakítószilárdság-vizsgálatára alkalmas próbatestek, polipropilénből, illetve polietilénből készültek.

A polietilén ömledéket újrahasznosított HDPE, míg a polipropilén ömledéket tiszta granulátum képezte. A pneumatikus fröccsöntő gép 6 bar nyomáson volt működtetve. A fröccsöntő henger hőmérséklete polietilén fröccsöntése esetében 265 °C, míg a polipropilén esetében 280 °C volt.



11. ábra. Polipropilén és polietilén fröccsöntési nyomásgörbéje az 1-es (narancssárga) és 2-es (kék) érzékelők jeleivel ábrázolva

8. Következtetések

Kijelenthető, hogy sikeresen elkészült egy, a fröccsöntési nyomás mérésére alkalmas berendezés. Sikertelenül elkészíteni az áramkört, illetve a szükséges programokat mind a mikrovezérlőre, mind a felhasználói felületre. A rendszerrel gyakorlati méréseket is sikerült végeznünk.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: *A polimertechnika alapjai*. 2007. 1–453.
- [2] Gliwa P.: *Microprocessor Technology Basics*. In: *Embedded Software Timing*, Cham. Springer International Publishing, 2021, 13–36.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-64144-3_2.
- [3] Sensors for Monitoring of the Injection Molding Process. [Online].
<https://www.kistler.com/KR/en/sensors-for-monitoring-of-the-injection-molding-process/C00000060>
- [4] ESP32 diagram. [Online]
<https://iztuts.com/lap-trinh-cho-esp32-wroom/>
- [5] CavityEye Catalogue. CavityEye, Kecskemét. [Online].
https://cavityeye.com/media/files/pdf/catalog2019_v1_pressure_sensors.pdf
- [6] Avia, „Data Sheet - HX-711”, Avia Semiconductor, 1/1. (2017) 1–9.