



**SAPIENTIA**  
ERDÉLYI MAGYAR  
TUDOMÁNYEGYETEM  
Marosvásárhelyi Kar

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**HŐRE LÁGYULÓ POLIMEREK  
FRÖCCSÖNTÉSI ÜREGNYOMÁSÁNAK  
MÉRÉSÉRE ALKALMAS BERENDEZÉS  
TERVEZÉSE**

**Szerző Keresztes Kristof**

Mechatronika BSc. szak, IV. évf.

**Konzulens Dr. Gergely Attila Levente**

Egyetemi docens

Marosvásárhely, 2024

**SAPIENTIA ERDÉLYI MAGYAR TUDOMÁNYEGYETEM**

**HŐRE LÁGYULÓ POLIMEREK FRÖCCSÖNTÉSI ÜREGNYOMÁSÁNAK  
MÉRÉSÉRE ALKALMAS BERENDEZÉS TERVEZÉSE**

**DESIGN OF A CAVITY PRESSURE MONITORING SYSTEM FOR  
PLASTIC INJECTION MOLDING**

Keresztes Kristof

Konzulens:

Dr. Gergely Attila Levente

Kézirat lezárva: 2024.03.07

## **Abstract**

The aim of this work is 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 of Technical and Human Sciences, Târgu Mures. The design criteria were the ease to mount and use. The equipment was implemented with two load cells, two HX711 amplifiers, an ESP32 based development board 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, we also paid attention to the practical applicability of the equipment.

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

## Kivonat

A dolgozat célja egy eszköz létrehozása, mely lehetővé teszi az üregnyomás mérését műanyag fröccsöntés közben. A tervezett berendezés a Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Karának Polimertechnológiai laboratórium 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 fejlesztői lappal, 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, mikrovezérlő, üregnyomás, LabVIEW, erőmérő cella

# Tartalomjegyzék

|          |                                                   |    |
|----------|---------------------------------------------------|----|
| 1.       | Bevezető.....                                     | 8  |
| 2.       | Célkitűzés.....                                   | 8  |
| 3.       | Bevezető a polimerek feldolgozásába.....          | 8  |
| 3.1.     | Polimerek osztályozása feldolgozásuk szerint..... | 8  |
| 3.2.     | Hőre lágyuló műanyagok feldolgozása.....          | 9  |
| 3.3.     | Fröccsöntés .....                                 | 10 |
| 3.4.     | A fröccsöntőgép .....                             | 10 |
| 4.       | A mikrovezérlők alapjai.....                      | 11 |
| 5.       | A fröccsöntési üregnyomás mérése .....            | 12 |
| 6.       | A berendezés felépítése.....                      | 13 |
| 6.1.     | Hardware.....                                     | 13 |
| 6.1.1.   | ESP32 Mikrovezérlő.....                           | 13 |
| 6.1.2.   | RC15-5 Erőmérő cellák .....                       | 14 |
| 6.1.3.   | HX711 Erősítők .....                              | 15 |
| 6.1.4.   | 3D nyomtatott doboz.....                          | 16 |
| 6.2.     | Software .....                                    | 16 |
| 6.2.1.   | ESP32 programok.....                              | 16 |
| 6.2.1.1. | Főprogram.....                                    | 16 |
| 6.2.1.2. | Mintavételezési idő meghatározása .....           | 18 |
| 6.2.1.3. | Program az érzékelők kalibrálásához.....          | 19 |
| 6.2.2.   | LabVIEW program .....                             | 21 |
| 6.2.2.1. | LabVIEW program felhasználói felülete .....       | 21 |
| 6.2.2.2. | LabVIEW program blokk diagramm .....              | 22 |
| 7.       | Berendezés összeszerelése .....                   | 25 |

|     |                                     |    |
|-----|-------------------------------------|----|
| 8.  | Mérési eredmények .....             | 26 |
| 9.  | Konklúzió.....                      | 27 |
| 10. | Továbbfejlesztési lehetőségek ..... | 27 |
| 11. | Irodalomjegyzék .....               | 28 |

# Ábrajegyzék

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ábra: a.) Direkt és b.) Indirekt (transzfer csapos) nyomásmérési módszer [4] .....                                                           | 12 |
| 2. ábra: A tervezett berendezés felépítési diagramja .....                                                                                      | 13 |
| 3. ábra: ESP32 mikrokontroller csatlakozóinak diagrammja [5] .....                                                                              | 14 |
| 4. ábra: RC15-5 erőmérő cella.....                                                                                                              | 15 |
| 5. ábra: a.) HX711 áramkör b.) Tipikus bekötési diagram híd típusú érzékelővel [7] .....                                                        | 15 |
| 6. ábra: Tároló doboz és a bele helyezett alkatrészek.....                                                                                      | 16 |
| 7. ábra: A START jel érkezését váró while ciklus .....                                                                                          | 17 |
| 8. ábra: Mintavételező Arduino program a HX711 könyvtárat felhasználva.....                                                                     | 18 |
| 9. ábra: Mintavételezési idő meghatározására alkalmas Arduino program.....                                                                      | 19 |
| 10. ábra: Az érzékelők kalibrálásához használt Arduino program .....                                                                            | 20 |
| 11. ábra: A két erőmérő cella kalibrációs görbéje.....                                                                                          | 21 |
| 12. ábra: A LabVIEW program felhasználói felülete .....                                                                                         | 22 |
| 13. ábra: Teljes LabVIEW blokk diagram .....                                                                                                    | 23 |
| 14. ábra: Kalibrálási ciklus LabVIEW grafikus felületen.....                                                                                    | 24 |
| 15. ábra: Mérési ciklus blokk diagrammja.....                                                                                                   | 24 |
| 16. ábra: Az összeszerelt berendezés a tároló tokba helyezve .....                                                                              | 25 |
| 17. ábra: a.) Az érzékelők fröccsöntő szerszámba szerelve b.) Fröccsöntött próbatestek .....                                                    | 26 |
| 18. ábra: a.) Polietilén és b.) Polipropilén fröccsöntési nyomásgörbéje az 1-es (kék) és 2-es (narancssárga) érzékelők jeleivel ábrázolva ..... | 26 |

## **1. Bevezető**

A XXI. század során különböző technológiák terén számtalan fejlemény valósult meg, amelyek közé a polimerek gyártástechnológiája is sorolható. A polimerekkel kapcsolatos ismereteink növekedése, ezeknek gyártási technológiájának fejlődése és számos további előnyük következtében a műanyagok helyet nyertek a mindennapjainkban. Minőségük továbbfejlesztése következtében egyre több alkatrészt képesek vagyunk lecserélni polimerekből készült alkatrészekre. Erre egy tökéletes példa az autóipar, ahol a polimerek alacsony sűrűségük, gazdaságos előállíthatóságuk, illetve kedvező tulajdonságaiknak köszönhetően egyre nagyobb szerepet kapnak, a korábban fémekből készített alkatrészek kiváltásában. A legyártott mennyiség az igénnyel arányosan egyre csak növekszik, így kijelenthető, hogy a polimerek feldolgozása a napjaink egyik legnagyobb iparágazata.

## **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 Karának a Polimertechológia 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. Bevezető a polimerek feldolgozásába**

### **3.1. Polimerek osztályozása feldolgozásuk szerint**

Polimerek formázása során fontos ismerni, hogy az anyag miként reagál a hőmérsékletváltozásra, milyen a termikus viselkedése

- Hőre nem lágyuló műanyagok – duroplasztok: térhálós szerkezetük miatt feldolgozás után nem alakíthatóak, ridegek, nem olvaszthatóak (bakelit)
- Hőre lágyuló műanyagok – termoplasztok: amorf, vagy csak kismértékben térhálós anyagok; láncszerkezetük általában lineáris vagy elágazó
- Hidegen keményedő – ragasztók

A polimerek imént említett tulajdonságai hőmérsékletváltozás esetén főként a mikroszerkezetükből származnak. Két főbb fajtát különböztetünk meg: amorf és kristályos

szerkezetű polimerek [1]. Az amorf polimerek általában átlátszóak, jól színezhetők. Ha nem tartalmaznak lágyító ágenseket, hidegen rideg tulajdonságokkal rendelkeznek, üvegesedési hőmérséklet fölött viszont képlékeny agyagként viselkednek, jól alakíthatók. Rendezetlen láncszerkezetük miatt húzófeszültség hatására a molekulák részben orientálódnak, így az anyag szilárdsága egyik irányban jelentékesen megnő, merőleges irányban pedig csökken. A kristályos szerkezetű polimerek neve félrevezető. Ilyen anyagok esetében csupán emelt szintű a kristályosság foka az amorf polimerekhez képest, viszont általában az 50-90%-os rendezettségi intervallumba sorolhatók. Ezeket részlegesen kristályos polimereknek nevezzük [1].

Annak érdekében, hogy műanyagot állítsunk elő, szükség van még egy lépésre, hiszen a polimerek önmagukban nem műanyagok. A polimerizáció utolsó lépésében a polimerhez adalékok hozzáadása szükséges annak érdekében, hogy a folyamat műanyagot eredményezzen. Ezen adalékok megváltoztathatják úgy az anyag hőtani és mechanikai tulajdonságait, mint a szerkezetét. A hőre lágyuló műanyagok feldolgozása esetében jellemző a minimális és újra feldolgozható gyártási hulladék. Ez annak köszönhető, hogy a megszilárdulás során nem megy végbe kémiai reakció, így a végtermék összetétele azonos a feldolgozás elején használt ömledék összetételével [2].

### **3.2. Hőre lágyuló műanyagok feldolgozása**

A hőre lágyuló műanyagok esetében a formálásuk és feldolgozásuk legtöbb esetben a megkeményedést megelőző fázisban, ömledék formájában történik. Ennek legelterjedtebb megmunkálási technológiái:

- Extrúzió
- Fröccsöntés
- Extrúziós fúvás
- Vákuumformázás
- Fóliagyártás
- Rotációs öntés
- Kalanderezés

Az ömledék folyási karakterisztikájának tanulmányozása érdekében indokolt különböző modellek használata. Az ömledék elasztikus tulajdonságának leírására a Hooke modell használható. Ez az

ideális rugalmasságot írja le és míg nem tükrözi tökéletesen az anyagok valós viselkedését, bizonyos esetekben nem hagyható figyelmen kívül. A Newton modell az ömledék viszkózus tulajdonságát írja le nagyon alacsony, illetve nagyon magas igénybevételek esetében. A valós folyási tulajdonságot viszont a struktúrviszkózus modell írja le, az ömledék viszkózus tulajdonságát írja le nagyon alacsony, illetve nagyon magas igénybevétel esetében. A valós folyási tulajdonságot viszont a struktúrviszkózus modell írja le, mely a Newtoni és a hatványfüggvény modell egyesítésével jött létre [2].

### **3.3. Fröccsöntés**

A fröccsöntés alapelve az alacsony viszkozitású műanyagolvadék zárt szerszámba való “fecskendezése”. Ez szűk járatokon keresztül történik. Elengedhetetlen a kis viszkozitás a szerszám gyors és teljes kitöltése érdekében. A teljes kitöltést (hőre lágyuló műanyagok esetében) magas fröccsöntőnyomással is elősegítik. A fröccsöntési folyamat alapvető természete miatt az ömledék lehűlése másodpercek tartományába esik, illetve nagy méretpontosságú végterméket eredményez. Emellett előnyt jelent az, hogy a fröccsöntés bonyolult formájú alkatrészek elkészítését is lehetővé teszi, melyek nem igényelnek további megmunkálást a vezetékszatórnákban megdermedt műanyag eltávolításán kívül [3]. A fröccsöntési technológiát felhasználva nagy tömegű alkatrészek (40-50 kg) elkészítése is lehetséges elegendően nagy fröccsöntőgéppel [2].

### **3.4. A fröccsöntőgép**

A fröccsöntőgép felelős az általában granulátum formában megjelenő műanyag megömlesztéséért és ennek a szerszámba juttatásáért. Ugyancsak a gép feladata a szerszám osztósíkmenti szétnyitása és a kilökörendszer működtetése. Ennek mechanizmusa a gyors és hatékony fröccsöntésre, illetve megszilárdulás utáni termékkilökésre van optimalizálva. A gép a fröccsöntési ciklus végrehajtásához szükséges mozgásokat teljesíti [2]:

- Szerszám zárása
- Fröccsöntő egység előre juttatása
- Befröccsentés
- Utónyomás és hűtés
- Fröccsegység hátra juttatása

- Szerszámnyitás
- Műanyag alkatrész kilökése

A tervezett berendezés a fröccsöntési ciklusból a műanyag befecskendezésének folyamatát segít vizsgálni. Mivel a műanyag fröccsöntéssel gyártott alkatrészek minőségében nagy szerepet játszanak a fröccsöntési paraméterek – többek között a fröccsöntési nyomás is – kimondottan hasznosnak bizonyulhat, ha ezeket ellenőrizni és vizsgálni tudjuk valós időben.

## 4. A mikrovezérlők alapjai

A mikrovezérlők olyan kis méretű, önállóan működő számítógépek, amelyek a digitális jelek feldolgozására, és a beágyazott rendszerek vezérlésére specializálódtak. Ez a technológia alapvető fontosságú számos alkalmazásban, beleértve az ipari automatizálást, háztartási eszközöket, járműveket, elektronikus eszközöket, orvosi berendezéseket és még sok más területet.

A mikrovezérlők olyan mikroprocesszorok, amelyek a CPU-t (Central Processing Unit) az operatív memóriával, perifériás bemeneti és kimeneti eszközökkel (pl. szenzorok, motorok) egyetlen chipre integrálják. Ennek az integrációnak köszönhetően a mikrovezérlők kis helyet foglalnak el, alacsony energiafogyasztással rendelkeznek, és gazdaságosan gyárthatók nagy mennyiségben.

A mikrovezérlők rendkívül programozhatók, ami azt jelenti, hogy a fejlesztők saját alkalmazásaikhoz megfelelő szoftvert hozhatnak létre a mikrovezérlőkön. Ez lehetővé teszi a fejlesztők számára, hogy testre szabott megoldásokat készítsenek, amelyek pontosan illeszkednek az adott feladathoz.

A mikrovezérlők fontos részei a perifériás egységek, mint például az analóg-digitális átalakítók (ADC), digitális-analóg átalakítók (DAC), időzítők, kommunikációs interfészek (UART, SPI, I2C) és a GPIO (General Purpose Input/Output) pinek. Ezek a perifériák lehetővé teszik a mikrovezérlők számára a külvilággal való kommunikációt és az inputok, illetve outputok kezelését.

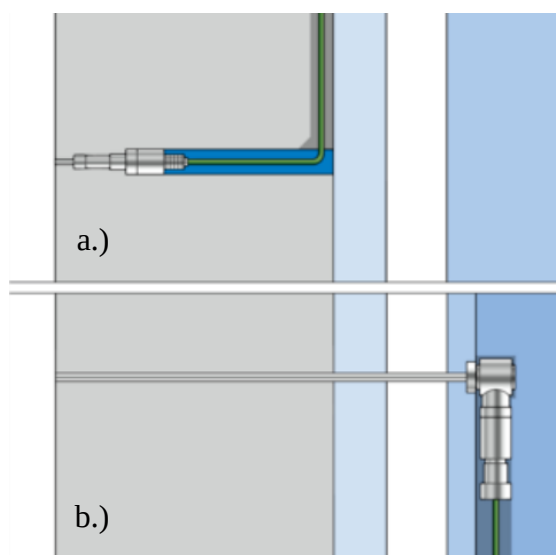
A mikrovezérlők különböző architektúrákban és teljesítményszinteken érhetők el, ami lehetővé teszi az alkalmazások széles skálájának lefedését. A programozásukhoz általában speciális fejlesztői eszközökre van szükség, amelyek lehetővé teszik a kód feltöltését a mikrovezérlőre,

viszont elérhetőek ún. fejlesztői lapok is (Development Boards), melyek a mikrovezérlőn kívül tartalmaznak minden szükséges alkatrészt, hogy egy személyes számítógép elegendő legyen a programozásukhoz.

## 5. A fröccsöntési üregnyomás mérése

Az üregnyomás mérésének lehetősége fröccsöntés közben rendkívül hasznos, hiszen betekintést ajánl abba, hogy pontosan mi, mikor és hogyan történik a környezetétől elszigetelt szerszámüregben belül. Az érzékelő szerepe egy ismert összefüggés létrehozása esetünkben az érzékelt erő és az általa kibocsájtott jel között. Erőmérő cellák esetében ez az összefüggés nagyban lineáris (nem-linearitásuk  $<1\%$ ), így kalibrálásuk relatív egyszerű. Az iparban nyomásmérő cellák mellett elterjedten használnak nyúlásmérő bélyegeket, illetve piezo-kristályos technológiával működő szenzorokat is.

Az érzékelők típusától eltekintve két kategóriába sorolhatjuk a nyomásmérő eszközöket a szenzorok beépítése függvényében: direkt és indirekt módszer.



1. ábra: a.) Direkt és b.) Indirekt (transzfer csapos) nyomásmérési módszer [4]

Míg a direkt módszer kivitelezés szempontjából lehet egyszerűbb, hátrányokkal jár: pontatlanabb eredményekkel szolgál az indirekt módszerhez képest, illetve több karbantartás igényel, hiszen az érzékelők direkt kapcsolatba lépnek a forró műanyagömlédekkel minden fröccsöntési ciklus során. Emiatt a direkt módszer alkalmazása során különösen fontos nagy figyelmet fordítani az érzékelők

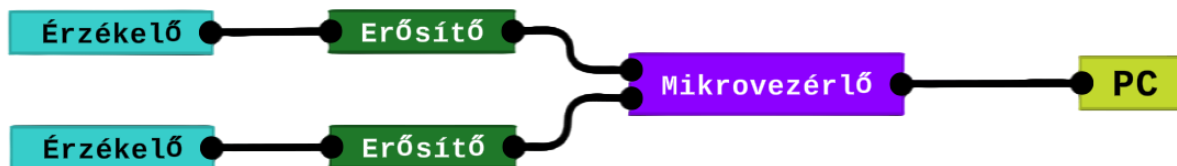
kiválasztására, hiszen ezek képesek kell legyenek működni abban a környezetben, ahová be lesznek szerelve.

Ezzel szemben az indirekt módszer egy transzfer csapat alkalmazva továbbítja fröccsöntési nyomásból származó erőt az érzékelőnek, így maga az érzékelő távolabb helyezkedik el a szerszámmüregtől, melynek hatására számottevően alacsonyabb hőmérsékletben fog kellenni működjön. Mindkét módszer esetében az érzékelők feladata a nyomás időbeli változásának érzékelése.

## 6. A berendezés felépítése

A berendezést, felépítését és működését tekintve, feloszthatjuk Hardware és Software részre:

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

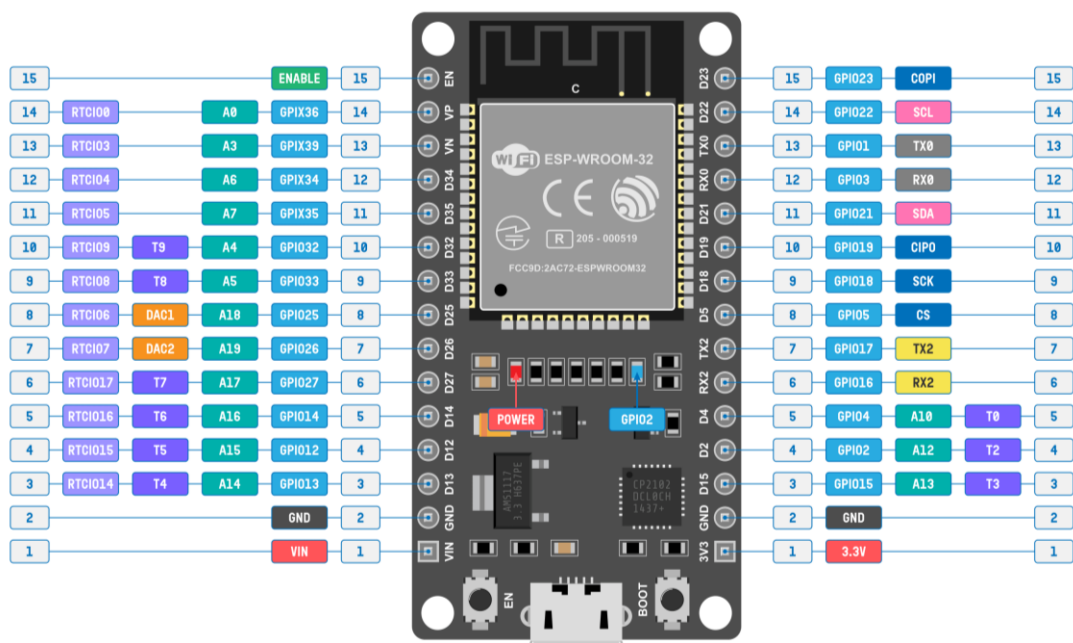


2. ábra: A tervezett berendezés felépítési diagramja

### 6.1. Hardware

#### 6.1.1. ESP32 Mikrovezérlő

A projekthez kiválasztott fejlesztői lap egy ESP32 típusú mikrovezérlővel ellátott készülék. Képességei célunknak tökéletesen megfelelnek, illetve előnyt jelent a fizikai mérete is, mely segít a berendezés végső méretének csökkentésében. A kiválasztott fejlesztői lap képes SPI, I2C vagy UART kommunikációs protokollokat alkalmazni. Az esetünkben kiválasztott protokoll az UART. Ennek oka főként az egyszerűség és a UART protokoll által biztosított megbízhatóság.



3. ábra: ESP32 mikrokontroller csatlakozóinak diagramja [5]

Amint a felső ábrán is látható, a választott mikrovezérlő számos Analóg Digitális konverterrel 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 iktattunk be az érzékelők és a mikrovezérlő közé.

### 6.1.2. RC15-5 Erőmérő cellák

A használt érzékelők híd típusú erőmérő cellák. Típusuk: RC15-5. Beszerzésüket a CavityEye KFT cégnek köszönhetjük, akik kutatásunk az érzékelők adományozásával támogatták.



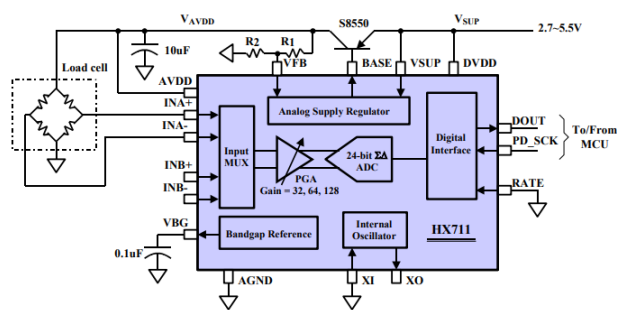
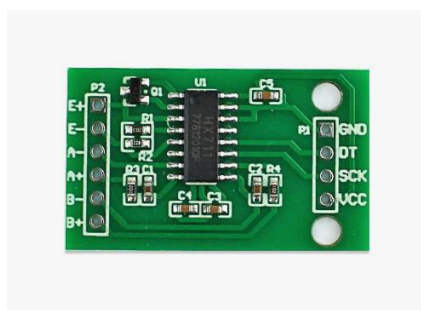
4. ábra: RC15-5 erőmérő cella

Az RC15-5 érzékelők elnevezése a Ring Cell megnevezésből származik. A számok a külső átmérőre, illetve a maximális terhelhetőségre utalnak, melyek esetünkben 15 mm és 5 kN. Működési hőmérsékletintervallumuk  $-40$  és  $+150^{\circ}\text{C}$  [6].

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

### 6.1.3. HX711 Erősítők

Mivel az érzékelők által kibocsájtott jel igen kicsi, ennek kellő pontossággal történő mérése egy erősítőt igényel. A pontosan erre a célra kifejlesztett HX711 áramkör műszererősítőjét alkalmazva kellően fel lehet erősíteni a jelet annak érdekében, hogy az hasznos eredményhez vezessenek. Az erősítési szorzó értéke 128, 64 vagy 32 (esetünkben 128). Emellett a HX711 áramkör rendelkezik egy Analóg Digitális átalakítóval is (ADC), melynek felbontásának 24 bit.

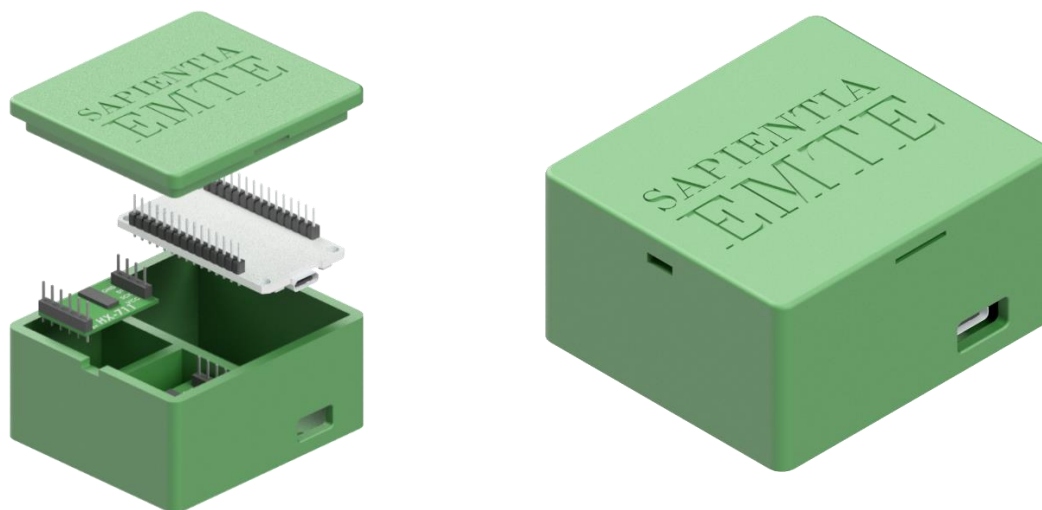


5. ábra: a.) HX711 áramkör b.) Tipikus bekötési diagram híd típusú érzékelővel [7]

A HX711 betáplálási feszültségintervalluma 2.6 – 5.5 V. Az áramkörön található tápegységszabályozónak köszönhetően betáplálható úgy a mikrovezérlő 3.3 V, mint az 5 V (VIN) feszültségű lábáról, mely alkalmazását tovább egyszerűsíti [7].

#### **6.1.4. 3D nyomtatott doboz**

Egy hasonló projekt elkészítése során felmerül az összeszerelés kérdése. Esetünkben egy nyomtatott áramkör tervezése és kivitelezése jelentené az ideális megoldást erre a problémára, viszont a rendelkezésünkre álló idő nem engedte meg ennek megvalósítását. Mivel nem ajánlott, hogy az elektromos alkatrészeket csupán a vezetékeik tartsák össze, 3D nyomtatás technológiával elkészült egy rekeszes tároló doboz, mely biztosítja a véletlen érintkezések elkerülését.



6. ábra: Tároló doboz és a bele helyezett alkatrészek

## **6.2. Software**

### **6.2.1. ESP32 programok**

#### **6.2.1.1. Főprogram**

A mérés során szükséges elvégezni egyes aritmetikai műveleteket annak érdekében, hogy az érzékelőktől kapott jelnek értelmet adhassunk. Ezen műveletek elvégzése kötelező, viszont az nem tekinthető megszabottnak, hogy kötelezően a mikrovezérlő vagy a számítógépes program kell elvégezze. A tervezés iterációja során tesztelve volt a berendezés különböző munkafelosztással a

mikrovezérlő és számítógép között, melynek eredményeként az a konklúzió született, hogy az időigényesebb számítások terhet előnyös levenni a mikrovezérlőről. Ennek oka a mintavételezési idő minimalizálása, hiszen minél kevesebb, és minél egyszerűbb műveleteket kell elvégezzen a mikrovezérlő, annál nagyobb frekvenciával tud mintavételezést végrehajtani.

A tervezés során a mikrovezérlő program olyan változatai is tesztelve voltak, melyben a mikrovezérlő egy ciklusban addig várt, amíg megkapta a számítógépes felhasználói felületről a “START” jelet. Míg ez a kivitelezés is teljes mértékben működőképesnek bizonyult, használatát mellőztük, hiszen szükségtelen komplexitást vezetett be a programba, mely teljes mértékben elkerülhető anélkül, hogy a berendezés funkcionalitásának bármely részéről is le kellene mondanunk.

```
void loop() {  
    bool startSignalReceived = false;  
    while (!startSignalReceived) {  
        if (Serial.available()) {  
            char receivedByte = Serial.read();  
            if (receivedByte == 'S') {  
                startSignalReceived = true;  
            }  
        }  
    }  
}
```

7. ábra: A START jel érkezését váró while ciklus

A mikrovezérlő programjának megírására az Arduino fejlesztői környezet volt használva, hiszen ez teljesen kompatibilis az ESP32 alapú mikrovezérlőkkel. A fenti okokból kifolyólag a következő program került a mikrovezérlőre:

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  scale1.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_S1, LOADCELL_SCK_PIN_S1);
  scale2.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_S2, LOADCELL_SCK_PIN_S2);

  scale1.tare();      // nullázzuk a skálát
  scale2.tare();
}

void loop() {

  if (scale1.is_ready() && scale2.is_ready()) {

    // HX711 nyers kimenete
    long rawValue1 = scale1.read();
    long rawValue2 = scale2.read();

    // adat küldése a LabVIEW programnak
    Serial.print(rawValue1);
    Serial.print(", ");
    Serial.println(rawValue2);
  }
}

```

8. ábra: Mintavételező Arduino program a HX711 könyvtárat felhasználva

#### 6.2.1.2. Mintavételezési idő meghatározása

Annak érdekében, hogy a LabVIEW környezetben fejlesztett programot optimalizálni lehessen, szükséges volt megbecsülni a mikrovezérlő program fő ciklusának lefutásához szükséges időt. Ez rendkívül fontos, hiszen a kommunikáció a mikrovezérlő és a PC között az UART protokollra alapszik, mely egy soros kommunikációs eljárás.

A program ciklusának lefutási ideje, mely egyben a mintavételezés idejét is jelenti, a következő programmal lett meghatározva:

```

1  #include <HX711.h>
2
3  // HX711 circuit wiring
4  const int LOADCELL_DOUT_PIN = 18; // HX711 DOUT pin
5  const int LOADCELL_SCK_PIN = 19; // HX711 SCK pin
6
7  HX711 scale;
8
9  unsigned long oldStartTime;
10 unsigned long newStartTime;
11 unsigned long executionTime;
12
13 void setup() {
14     Serial.begin(115200);
15     scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
16 }
17
18 void loop() {
19
20     if (scale.is_ready()) {
21         long rawValue = scale.read();
22
23         Serial.print(rawValue);
24
25         oldStartTime = newStartTime;
26         newStartTime = micros();
27         executionTime = newStartTime - oldStartTime;
28         Serial.print(", Execution time (us): "); Serial.println(executionTime);
29     }
30 }

```

9. ábra: Mintavételezési idő meghatározására alkalmas Arduino program

A fent látható program nem csak a mintavételezéshez szükséges parancsokat, hanem az idő mérésére szükséges sorokat is tartalmazza. Míg igaz az, hogy így nem csak a mintavételezés idejét mérjük, fontos figyelembe tartani azt is, hogy az idő méréséhez használt változókkal végzett műveletek elvégzése nagyságrendekkel kevesebb időt igényel, mint a HX711 Analóg Digitális átalakításának ciklusa, így elhanyagolhatónak nevezhető az eltérés, és hitelesnek a mérés. Az ezen program által szolgáltatott eredmény  $\sim 185$  ms ( $\pm 1$  ms).

### 6.2.1.3. Program az érzékelők kalibrálásához

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

A program mindkét szenzorról érkező nyers értéket kiírja a soros kommunikáció segítségével, melyet a felhasználó le tud olvasni. A kalibráció során több iterációban lejegyeztük a következő értékeket:

- Az érzékelők kimenete terheletlen állapotban
- Az érzékelők kimenete egy ismert terhelés mellett
- Az érzékelők kimenete 10 s terhelés után

```

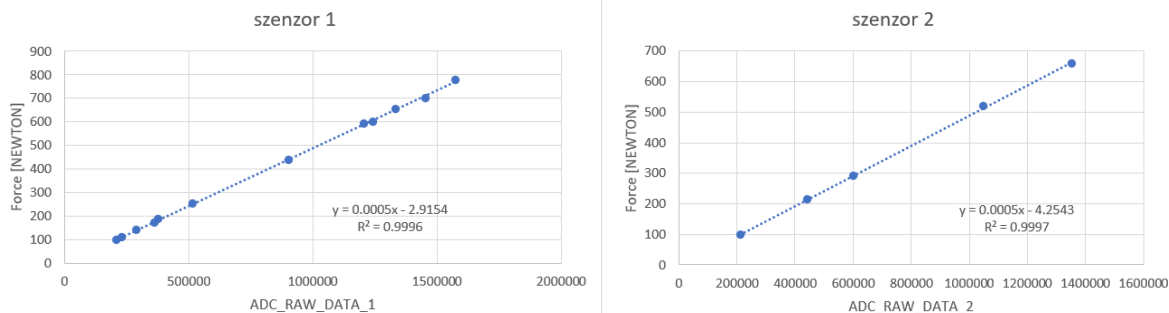
1  #include <HX711.h>
2
3  // HX711 circuit wiring
4  const int LOADCELL_DOUT_PIN_S1 = 18; // SENSOR_1 HX711 DOUT pin
5  const int LOADCELL_SCK_PIN_S1 = 19; // SENSOR_1 HX711 SCK pin
6
7  const int LOADCELL_DOUT_PIN_S2 = 33; // SENSOR_2 HX711 DOUT pin
8  const int LOADCELL_SCK_PIN_S2 = 32; // SENSOR_2 HX711 SCK pin
9
10 HX711 scale1;
11 HX711 scale2;
12
13 void setup() {
14   Serial.begin(115200);
15   scale1.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_S1, LOADCELL_SCK_PIN_S1);
16   scale2.begin(LOADCELL_DOUT_PIN_S2, LOADCELL_SCK_PIN_S2);
17 }
18
19 void loop() {
20   if (scale1.is_ready() && scale2.is_ready()) {
21     long rawValue1 = scale1.read();
22     long rawValue2 = scale2.read();
23
24     Serial.print(rawValue1);
25     Serial.print(", ");
26     Serial.println(rawValue2);
27   }
28 }

```

**10. ábra:** Az érzékelők kalibrálásához használt Arduino program

Az erőmérő cellák egy tulajdonsága az ún. “creep”, mely abban nyilvánul meg, hogy konstans terhelésnél a kimeneti jel folyamatosan csökken. Ennek oka a fémtan tudományában rejlik, viszont hatása a tervezett berendezést is befolyásolhatja. A mérési pontatlanságok elkerülése érdekében 2 időpillanatban voltak az érzékelők kimenetei leolvasva: először a leterhelés pillanatában (amint állandósult a jel), majd 10 másodperc múlva újra. Ennek célja az érzékelők creep hatásának minimalizálása. Említésre méltó viszont, hogy egy fröccsöntési ciklus időtartama ~10 másodperc, amely alatt a kimenet változása a creep hatására ~0.1% nagyságrendű. Ebből adódóan elhanyagolhatónak tekinthető fröccsöntési üregnyomás mérése esetén.

A kalibrálási mérések következtében feldolgoztuk az adatokat, melyek vallomást tettek az érzékelők által kiadott jel és a rájuk ható erő közötti kapcsolat linearitására. A regressziós együttható négyzete ( $R^2$ ) 0.9997, illetve 0.9996 a két érzékelő esetében.



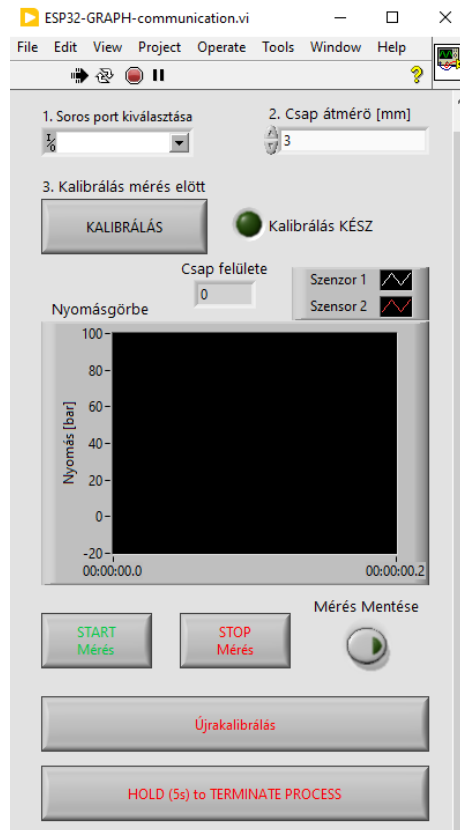
11. ábra: A két erőmérő cella kalibrációs görbéje

## 6.2.2. LabVIEW program

### 6.2.2.1. LabVIEW program felhasználói felülete

A LabVIEW program felhasználói felületnek biztosítania kell a következő funkcionálisokat:

- Soros kommunikációs port kiválasztása
- A használt transzfer csap átmérőjének megadása
- Manuális indítása a kalibrálási folyamatnak
- A mérés megkezdése, illetve leállítása
- Adatok lementése
- Manuális indítása az újra-kalibrálási folyamatnak



12. ábra: A LabVIEW program felhasználói felülete

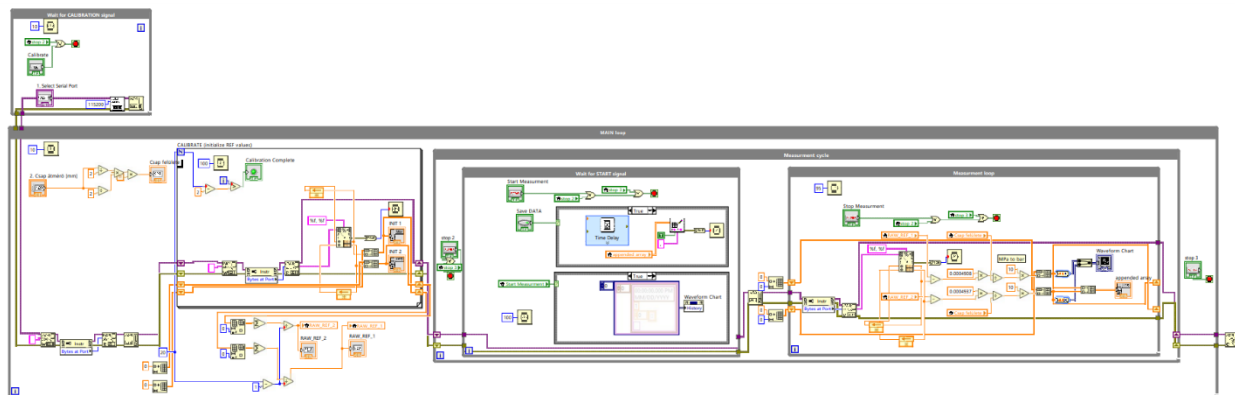
A felhasználói felület tervezése során a kontrolok intuitív elhelyezésére került a hangsúly. Az alkalmazásban látható, hogy a rendszer inicializálásához szükséges lépések sorrendje megegyezik a gombok elhelyezési sorrendjével (fentről lefelé).

A felhasználónak lehetősége van kimenteni az utolsó mérési ciklusból származó adatokat a “Mérések Mentése” gombra kattintva. Abban az esetben, ha a mérési eredmények nem kívánatosak, a felhasználónak lehetőségében áll törölni az eredményt egy új mérés indításával, mely “kiüríti” a grafikon felületét.

#### 6.2.2.2. LabVIEW program blokk diagramm

A LabVIEW programfejlesztői környezet eltér más hasonló programtól abban, hogy kivitelezése teljes mértékben grafikus. A grafikus fejlesztői környezetben a felhasználónak lehetősége van a szokásos programozási struktúrák implementálására, mint például a while vagy for ciklus. Ezen

struktúrák, illetve a fejlesztői környezet más funkcionalitásának felhasználásával készült el a végső program.



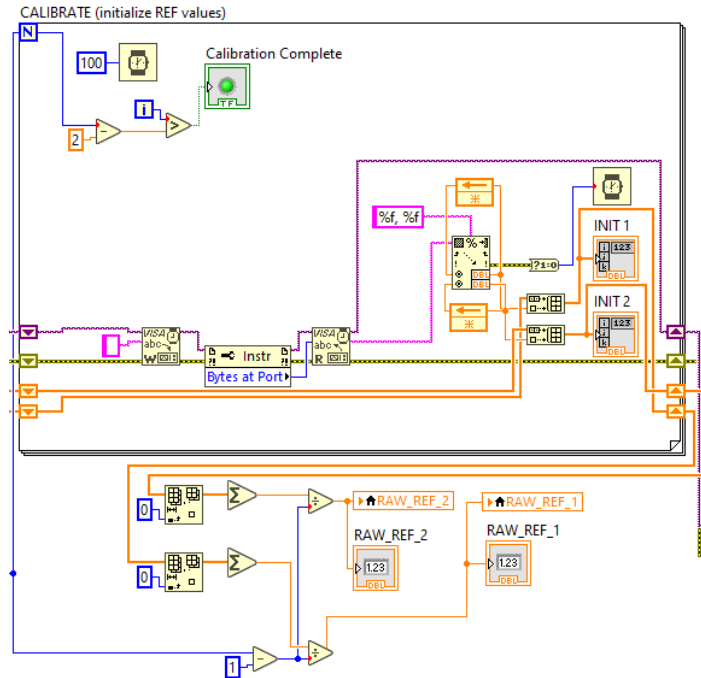
13. ábra: Teljes LabVIEW blokk diagram

A LabVIEW programcsomagban megtalálható VISA protokollok segítségével volt megvalósítva a mikrokontroller és a PC közötti soros kommunikáció [8].

Az **6.2.1.1** fejezetben kifejtett okokból kifolyólag a jelek feldolgozásának nagyrésze a számítógépes programmal volt elvégezve.

A **13. ábra** bal felső sarkában látható egy while ciklus elkülönítve a diagram többi részétől. Ezen ciklus szerepe a kalibráció START jelének a figyelése, melyet a felhasználó egy gombnyomással tud küldeni a grafikus kezelő felületről. Amint a szükséges jel megérkezett, a program belép a fő ciklusba.

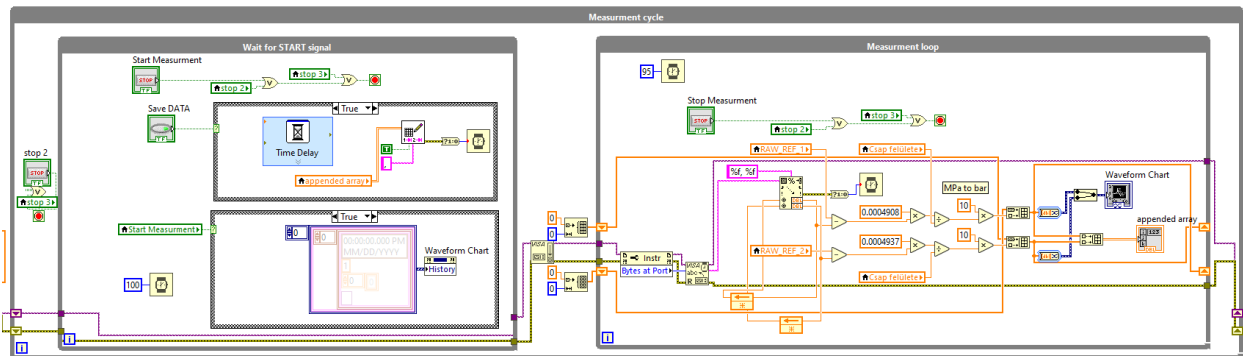
A fő ciklus szerepe a program összes funkciójának a megismételhetősége a program újraindítása nélkül. A ciklus első lépése az érzékelők referenciaértékének meghatározása. Ennek megvalósítása hozzávetőlegesen egyszerű: a szenzorokat terheletlenül hagyva a program elvéggez 20 mintavételezést, melyek eredményének átlagát elmenti és az ezt követő méréseket ehhez fogja viszonyítani. Ez minden programindítás után lefut, viszont bármikor igényelheti a felhasználó a program használata közben is, ha szükség van rá.



14. ábra: Kalibrálási ciklus LabVIEW grafikus felületen

A fenti „for” ciklus során a program fogadja a soros kommunikációs porton keresztül érkező adatokat a mikrovezérlőtől, és ezeket egy tömbbe helyezi. 20 iteráció lefutása után kiszámolja a begyűjtött érték átlagát, majd elmenti a RAW\_REF\_1, illetve RAW\_REF\_2 változókba, melyeket későbbi ciklusaiban felhasznál.

A kalibrálási ciklusból kilépve a program eljut a fő funkcionálisát nyújtó részhez: a mérési ciklushoz. A mérési ciklus a mintavételezés és ábrázolási folyamat elindításáért, illetve leállításáért felelős. A program felhasználása során a legtöbb időt ezen ciklusokban fog tölteni.



15. ábra: Mérés ciklus blokk diagrammja

A **14. ábrán** látható diagrammban 2 while ciklus van egy harmadikkal körülvéve. Ennek szerepe a két belső ciklus ismétlése. A “wait for START signal” (bal) ciklusban szerepel egy “switch-case” struktúra is, melynek szerepe az utolsó mintavételezés lementése egy, a felhasználói felületen lévő gomb függvényében. Ennek célja az, hogy a felhasználó szabadon dönthessen arról, hogy a mérési eredményeket lementésre kerülnek vagy sem. Ez egy kimondottan hasznos funkciónak bizonyult a program tesztelése során.

A jobb oldali ciklus szerepe az érzékelőktől érkező értékek feldolgozása. Ebben a lépésben felhasználásra kerül a korábban kiszámított RAW\_REF\_1 és RAW\_REF\_2 értékek, melyek segítségével, a helyes aritmetikai műveleteket elvégezve megkapjuk a végső értékeket. Ezeket tömbökbe gyűjtve ábrázoljuk a felhasználói felületre helyezett “Nyomásgörbe” grafikonon.

## 7. Berendezés összeszerelése

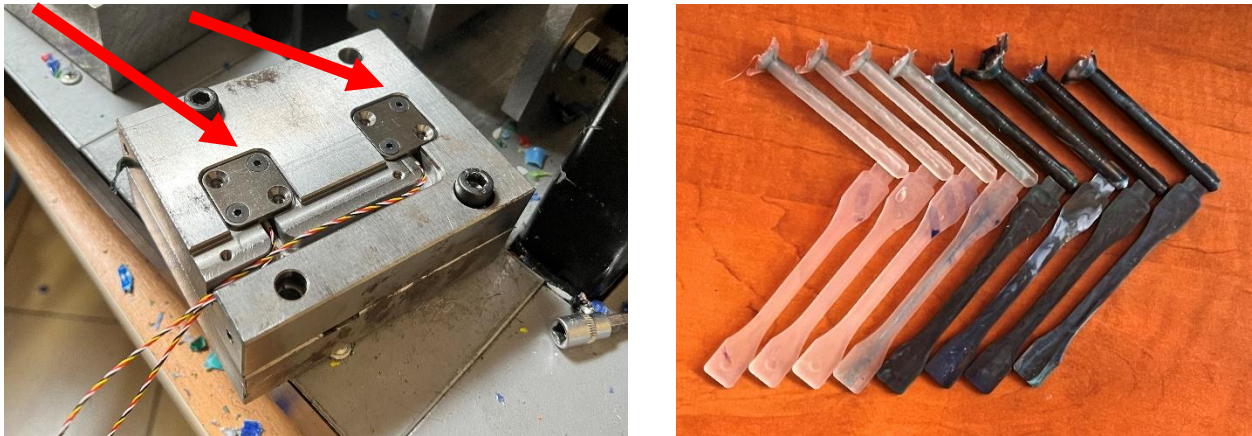
A berendezés elektromos komponenseinek összeszerelése az ezeken található lábak / pin-ek segítségével történt. Mivel ezen dolgozat elkészítése során nem volt lehetőségünk nyomtatott áramkört készíteni, a csatlakozók összekötése Arduino alkalmazásokhoz kapható vezetékek segítségével történt. A csatlakozások megvalósítása után az alkatrészeket belehelyeztük a számukra készített dobozba, melyből a betáplálás és adatkommunikációs, illetve az érzékelők vezetékai vannak kivezetve.



16. ábra: Az összeszerelt berendezés a tároló tokba helyezve

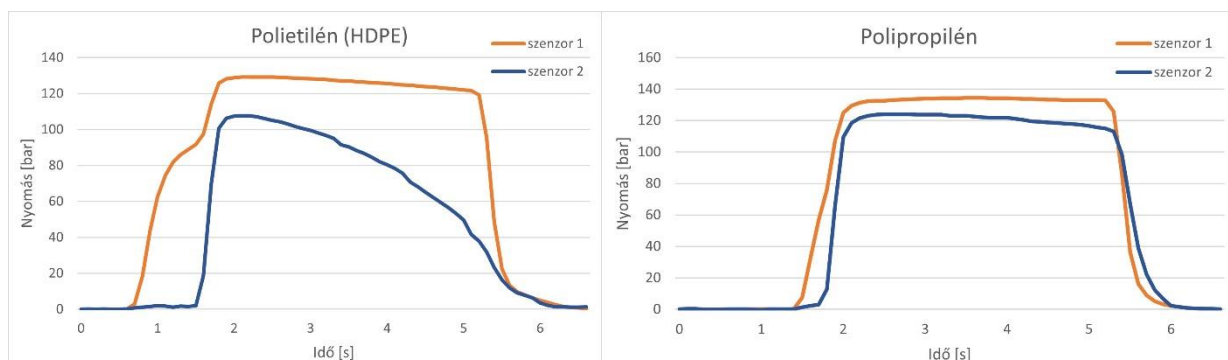
## 8. Mérési eredmények

A berendezés alkalmazhatóságának tesztelése érdekében üzembe helyeztük. Egy indirekt nyomásmérő módszer (5. fejezet) elvei alapján elkészült fröccsöntő szerszámba szereltük az érzékelőket, majd a Sapia EMTE Polimertechnológiai laboratóriumában próbaméréseket végeztünk. A fröccsöntés egy korábbi államvizsga dolgozat keretén belül elkészült pneumatikus fröccsöntőgép segítségével történt.



17. ábra: a.) Az érzékelők fröccsöntő szerszámba szerelve b.) Fröccsöntött próbatestek

A fröccsöntött próbatestek szakítószilárdság vizsgálatára alkalmasak, és polipropilénből (fehérek), illetve polietilénből (sötétkékek) készültek.



18. ábra: Polietilén és polipropilén fröccsöntési nyomásgörbéje az 1-es (narancssárga) és 2-es (kék) érzékelők jeleivel ábrázolva

A polietilén ömledéket újrahasznosított HDPE, míg a polipropilén ömledéket tiszta granulátum képezte. A pneumatikus fröccsöntőgép 6 bar nyomáson volt működtetve. A fröccsöntő henger hőmérséklete polietilén fröccsöntése esetében 270 °C, míg a polipropilén esetében 280 °C volt.

## **9. Konklúzió**

Konklúzióként kijelenthető, hogy sikeresen elkészült egy, a fröccsöntési nyomás mérésére alkalmas berendezés. Sikerült elkészíteni az áramköri elemeket, illetve a szükséges programokat úgy a mikrovezérlőre, mint a felhasználói felületre LabVIEW környezetben. A berendezéssel gyakorlati méréseket is sikerült végeznünk.

## **10. Továbbfejlesztési lehetőségek**

A továbbfejlesztési lehetőségek magukba foglalják a berendezés mérési eredményeinek összehasonlítását egy CavityEye típusú ipari nyomásmérő berendezés eredményeivel. Továbbá, tervben van egy nyomtatott áramkör tervezése és kivitelezése az elektromos alkatrészek számára, melyet egy új 3D nyomtatott doboz elkészítése fog követni. Ugyancsak fejlesztési lehetőséget jelent a fröccsöntőgép vezérlésének kivitelezése a mikrovezérlő segítségével, mely megengedné, hogy a fröccsöntési ciklust a LabVIEW felhasználói felületről indítsuk.

## 11. Irodalomjegyzék

- [1] M. Norbert, „Műanyagok kémiája és technológiája”. Pannon Egyetem, Veszprém, o. 1–97, 2012.
- [2] T. Czvikovszky, P. Nagy, és J. Gaál, „A polimertechnika alapjai”, o. 1–453, 2007.
- [3] K. Keresztes és A. L. Gergely, „Cserélhető betétes fröccsöntő szerszám tervezése”, *Műszaki Tudományos Közlemények*, o. 1–2, 2023, doi: 10.33895/mtk-2023.19.05.
- [4] „Sensors for monitoring of the injection molding process”. [Online]. Elérhető: <https://www.kistler.com/KR/en/sensors-for-monitoring-of-the-injection-molding-process/C00000060>
- [5] Circuitstate, „ESP32 Diagram”. Elérés: 2024. április 11. [Online]. Elérhető: <https://www.circuitstate.com/pinouts/doit-esp32-devkit-v1-wifi-development-board-pinout-diagram-and-reference/>
- [6] „CavityEye Catalogue”. CavityEye, Kecskemét.
- [7] Avia, „Data Sheet - HX-711”, *Avia Semiconductor*, köt. 1, sz. 1, o. 1–9, 2017.
- [8] National Instrumetns, „VISA Resource Name Control”. [Online]. Elérhető: [https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/lvinstio/visa\\_resource\\_name\\_generic.html](https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/lvinstio/visa_resource_name_generic.html)