



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Visnovszky Dominik
Tudományos Diákköri Dolgozat

POLIPROPILÉN LEMEZ EMISSZIÓS TÉNYEZŐJÉNEK KIMÉRÉSE

Konzulens:
Stadler Róbert Gábor
egyetemi tanársegéd

Budapest, 2024

Tartalom

1.	Absztrakt.....	3
2.	BEVEZETÉS	4
3.	SZAKIRODALOM ELEMZŐ FELDOLGOZÁSA.....	5
3.1	Polimerek napjainkban	5
3.2	Polimerek kötéstechológiája	7
3.3	Polimerek hegeszthetősége	8
3.4	Elterjedt polimerhegesztési eljárások	9
3.5	Polimerek kavará dörzshegesztése	11
3.6	Hőmérséklet fontossága	13
3.7	Hőmérséklet mérése.....	14
4.	Anyagok és módszer	17
4.1	Vizsgált polipropilén anyag	17
4.2	Bosch GTC 400 C.....	19
4.3	Testo emissziós szalag	20
4.4	Mérési elrendezés	21
4.5	Mérés menete	22
4.6	Mérések kiértékelése a GTC Transfer szoftverrel.	23
5.	Eredmények bemutatása	24
6.	Összefoglalás	27
7.	FELHASZNÁLT IRODALOM.....	29
8.	MELLÉKLETEK.....	31

Absztrakt

A polimerek vezető anyagcsoporttá válásával nélkülözhetetlen lett a gazdaságos és magas minőségű kötéstechológia megoldása. A kötéstechológiai megoldások közül kiemelkednek az anyaggal záró kötések, azon belül is a hegesztési folyamatok. A dolgozat első felében a polimerek hegesztésének feltételeit és a legelterjedtebb hegesztési technológiákat (ultrahang hegesztés, lézerhegesztés, forrógázos hegesztés) tekintem át, különös tekintettel a kavaró dörzshegesztésre, ugyanis a jövőben ilyen jellegű kísérleti méréseket szeretnék végrehajtani. A hegesztési folyamatok során jelentős hatása van a hőmérsékletnek, így a kísérleti mérések során szeretném vizsgálni a hegesztések során fellépő hőmérsékletet. Ennek érdekében a jelenlegi dolgozatban áttekintettem az objektumok emissziós tényezőjének kimérési lehetőségeit. A szakirodalmi áttekintés után a hegeszteni kívánt polipropilén lemez emissziós tényezőjét mértem ki érintésmentes hőmérési vizsgálattal. A dolgozat második felében a mérések során alkalmazott eszközöket és anyagokat mutatom be, végezetül pedig a mérési eredményeket értékelem ki. A mérések eredményei alapján meghatározásra került a polipropilén lemez emissziós tényezője, így a jövőben lehetőség van a pontos hőmérésekkel támogatott hegesztési folyamatok vizsgálatára.

1. Bevezetés

A téma választásában nagy szerepet játszott a hegesztési technológiák iránti, továbbá az anyagok fejlődésével járó jövőbeni új technológiák iránti érdeklődésem. A minket körülvevő világ megértésének alapja az, hogy a mindennapjainkban alkalmazott eszközöket megismerjük. Ezen eszközökön nagy mennyiségben alkalmaznak kötéstechológiákat. A kötéstechológiák egyik fő csoportja a hegesztés.

Jelenleg is több tanulmány foglalkozik a kavarási hőhegesztéssel. Egyes vizsgálatokban kiemelik a szerzők, hogy a technológia megoldást jelenthet a vastag polimer lemezek, továbbá hőre lágyuló mátrixú kompozitok hegesztésére. A forgó mozgást végző szerszám folyamatosan áramoltatja az ömledéket, ez által a tört szálerősítésű anyagot is áramoltatja a varratba. A technológiát fémek és polimerek hegesztésére is alkalmazzák. A hegesztések egyik fontos paramétere a hőmérséklet. Ezen paraméternek a vizsgálatáról a polimerek kavarási hőhegesztése során kis számú publikáció jelent csak meg, ezért ez egy ígéretes területnek számíthat a jövőben. A hegesztési hőmérséklet pontos mérése azonban nem egyszerű feladat. A mérések pontosságát a kontaktmentes mérések során a megfelelő emissziós tényező beállítása jelenti. Ezen érték mérését az ASTM ajánlása alapján végeztem.

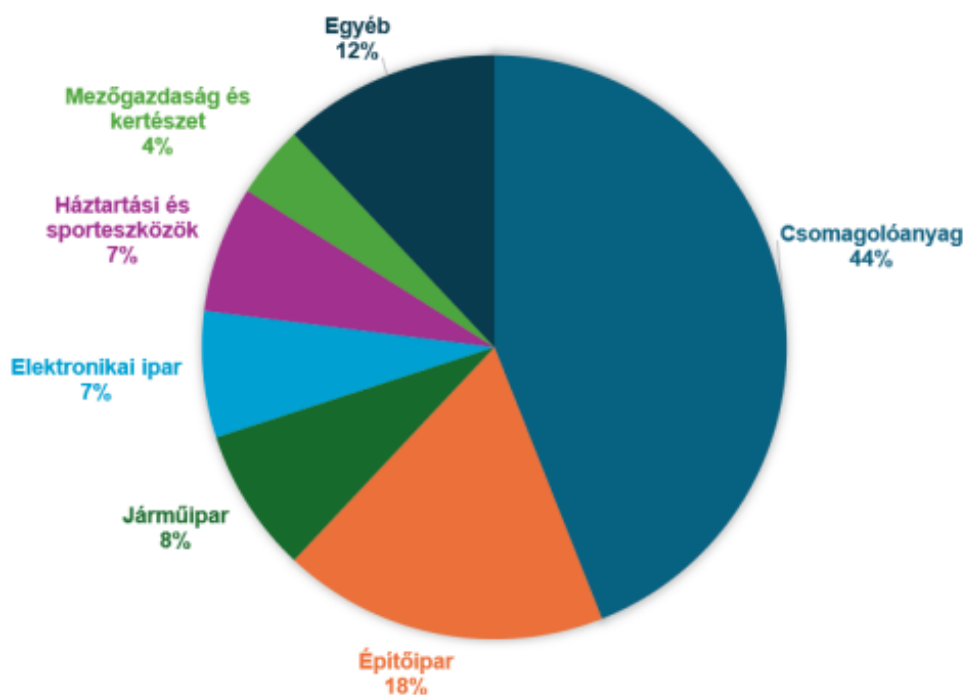
Az emissziós tényező ismeretével a későbbiekben lehetőség adódik pontos hegesztési hőmérséklet mérésre és a varrat jellemző hőmérsékleti viszonyainak megértésére.

2. SZAKIRODALOM ELEMZŐ FELDOLGOZÁSA

2.1 Polimerek napjainkban

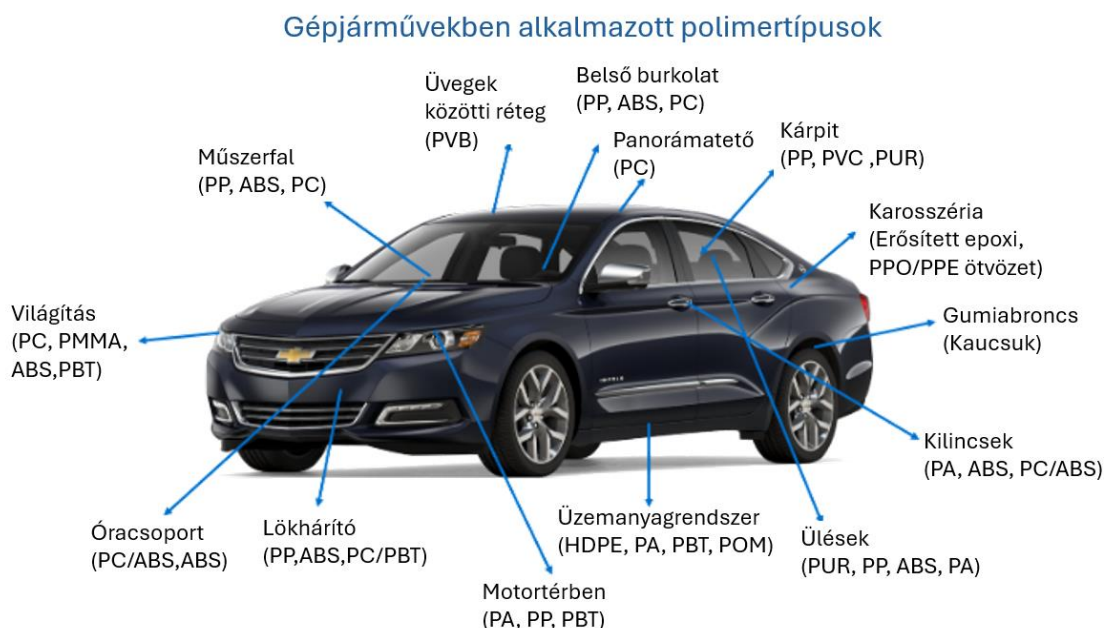
A polimerek napjaink vezető anyagcsoportja. Elsősorban a csomagolásiparban alkalmazzák.

Ezenkívül jelentős az orvosi, illetve gyógyászati felhasználásuk is (infúziós tasak, egyszer használatos fecskendő, illetve implantátumok), valamint az építőipar is nagy mennyiségben alkalmaz például PVC-t különböző csövek, ablakkeretek, és vezetékek szigetelésére. Polisztirolt pedig épületek szigetelésének. Ez utóbbi felhasználási lehetőségének köszönhető, hogy az elektronikai iparban is jelentős szerepe van a műanyagoknak. Az 1. ábrán látható, hogy a polimereket mely iparágakban alkalmazzák, és milyen arányban.



1. ábra Polimerek felhasználása iparáganként [1]

Érdeemes kiemelni, és kicsit külön kezelni a járműipart, amely egy vezető iparág. Az 1. ábrán jól látszik, hogy a felhasznált műanyagok 8%-át a járműipar alkalmazza. A 2. ábrán látható egy korszerű gépjármű, valamint, hogy mely elemei készülnek polimerből.



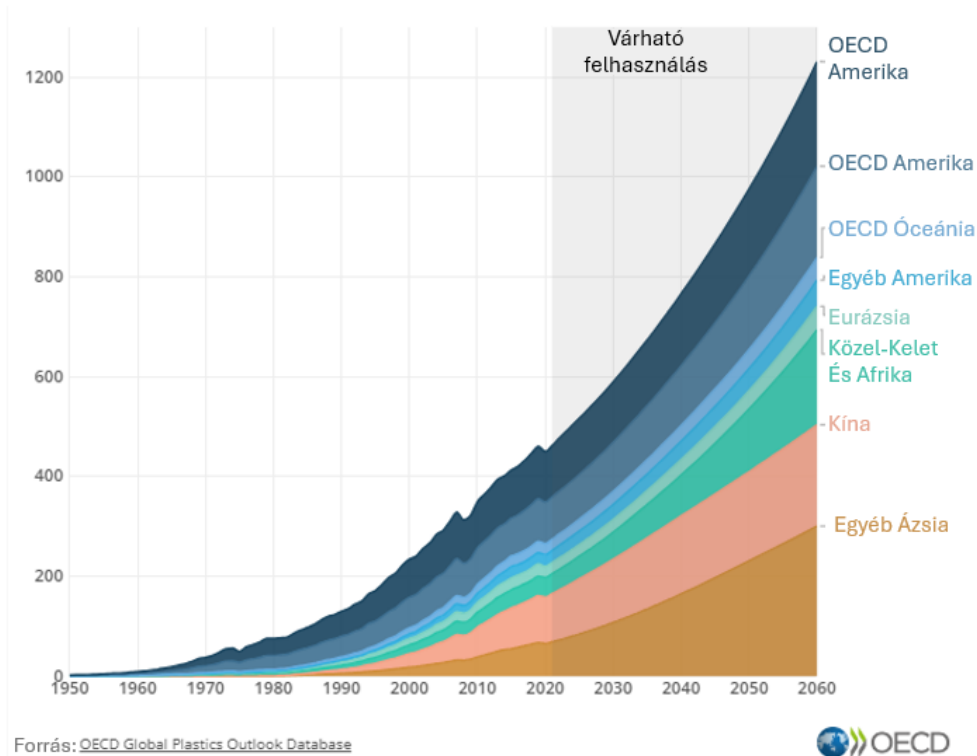
2.ábra Korszerű gépjárműben alkalmazott polimer anyagok [2]

A járműiparban történő alkalmazásának egyik nagy előnye, hogy a műanyagok kis sűrűséggel rendelkeznek, ebből következik, hogy jelentős tömeg csökkenést lehet elérni. A kisebb tömegű autó pedig kisebb fogyasztást és károsanyag kibocsátást eredményez. Ezen tulajdonságuk kiemelkedően fontos a továbbá a repülőgép, illetve űriparban, ahol minden gramm számít a működtetési költségek csökkentése miatt.

A műanyagok jól formálhatóak, önthetőek, korrózióra nem érzékenyek, továbbá alacsonyabb bekerülési költségüknek köszönhetően a tömeggyártás során a gyártó cég nagyobb profitot képes realizálni.

Az első teljesen szintetikus polimert 1907-ben Leo Hendrik Baekeland állította elő, melyet 1909 decemberében szabadalmaztatott is bakelit néven. A bakelit felfedezése elősegítette további műanyag típusok megjelenését. A műanyagok felhasználásának várható ütemét szemlélteti a 3.ábrán.

Világszerte jelentős növekedés várható a műanyagok felhasználásában Millió tonnában



3. ábra Műanyagok felhasználásának várható üteme

2.2 Polimerek kötéstechológiája

A különböző polimer anyagok elterjedt használata, illetve alkalmazástípusai eltérő kötéstípusokat követelnek meg, melyekre különböző kötéstechológiák alkalmasak. Polimer anyagok esetében a kötési módok lehetnek: mechanikus kötések, ragasztások, továbbá hegesztések. Mechanikus kötések során feszültséggyűjtő helyek keletkeznek, továbbá nem vízzáróak, viszont előnyük, hogy többnyire oldható kötésekkel biztosítanak. Ragasztások a polimerek csökkent felületi feszültsége, illetve környezetre való érzékenysége miatt nehézkesen kivitelezhető. Az előbb említett problémákra nyújtanak alternatívát a hegesztési eljárások. A polimerek esetében a legelterjedtebb kötéstechológiák, illetve azok csoportosítását szemlélteti a 4. ábrán.



4. ábra: Polimereken legtöbbet alkalmazott kötőeljárások osztályozása [3]

2.3 Polimerek hegeszthetősége

Megfelelő szilárdságú kötés kialakításához elengedhetetlen alaposan megvizsgálnunk a polimerek hegesztéséhez szükséges feltételeket, mivel csak ezen paraméterek betartása esetén jöhet létre megfelelő szilárdságú kötés.

A hegesztendő anyagoknak kompatibilisnek kell lenniük. Kiemelendő, hogy csak hőre lágyuló polimereket lehet hegesztetni, mivel a nem termoplasztikus műanyagokban egy kémiai irreverzibilis folyamat játszódik le, amikor az anyag nagyobb hőmérsékletet ér el, akár már akkor is, amikor még anyaguk nem is érte el az ömledékállapotot. Ezért csak a hőre lágyuló műanyagok hasznosíthatóak újra, mivel azok molekulaszervezete hőközlés hatására nem sérül, tehát többször is önthetőek, felhasználhatók. A hegesztési folyamat során továbbá biztosítani kell a megfelelő hőmérsékletet, illetve nyomást. A hegesztési folyamat hozaganyag hozzáadásával, illetve

nélkül is történhet. Fontos kritérium, hogy az anyagoknak összeférhetőnek kell lennie, azaz legalább közel azonos molekulaszervezettel kell rendelkezniük. A hőmérséklet kiemelt szerepet játszik a megfelelő kötés kialakításában. A hőmérsékletnek biztosítani kell, hogy az polimer ömledék képpen viszkozus legyen az anyag károsodása nélkül, továbbá a rugalmas fizikai állapotot is megteremtse. A hőközlésnek kontrolláltnak kell lennie. Fontos, hogy a hegesztendő felületek közelségét biztosítsuk, úgy, hogy közben megfelelő nyomást gyakorlunk a hegesztendő anyagra az azt megkövetelő ideig. A hegesztési folyamat vége a hegesztett kötés kontrollált lehűtése [4].

2.4 Elterjedt polimerhegesztési eljárások

A hegesztési eljárásokat rendszerbe foglalhatjuk a hőátadás módja szerint, mely csoportok a: hővezetési, mechanikai súrlódási, illetve sugárzási eljárások.

Hővezetési eljárások során egy felhevített test hőjét vezetik át a hegesztendő anyagokra, ezzel biztosítva a hőmérsékletet. A hőforrás, illetve a hőátadó lehet szilárd, folyékony vagy gáznemű [5].

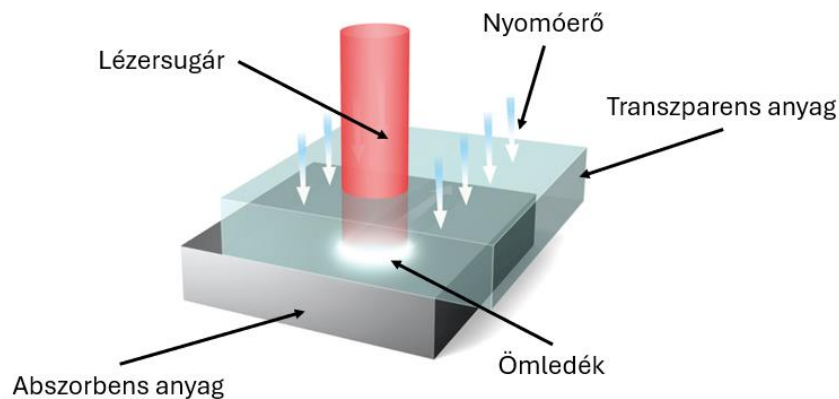
A forrógázos hegesztési eljárás során gázt hevítünk fel megfelelő hőmérsékletre, hogy az az alapanyagot képes legyen megolvasztani, ezáltal a két anyag molekulalánca egymásba diffundálhasson. A hőforrás általában éghető gáz, avagy elektromos fűtőelem az esetek többségében. Ezt a felfűtött gázt egy fűvókán keresztül juttatják el a kötés helyéhez. Ezen eljárás során hozaganyagot biztosítani kell, ezáltal további feltételeket is ki kell elégíteni [5]:

- A hozaganyag olyan anyag kell, hogy legyen, ami a hegesztési kívánt anyaggal összeférhető
- A hozaganyagnak biztosítani kell a hegesztéshez szükséges hőmérsékletet úgy, hogy azonos mértékben melegedjen fel, mint az alapanyag. Ennek a paraméternek a beállítása a gáz áramlásának szabályozásával történik.
- Amennyiben hozaganyagot adagolunk, abban az esetben biztosítanunk kell annak előtolását is, mely történhet kézi hegesztés során kézzel, illetve görgővel. Gépesített eljárás során az alapanyag előtolása biztosított.

További fontos eljárás a hővezetési csoporton belül a forrógázos extrúziós hegesztés, ami annyiban különbözik az előbb említett eljárástól, hogy ebben az esetben a

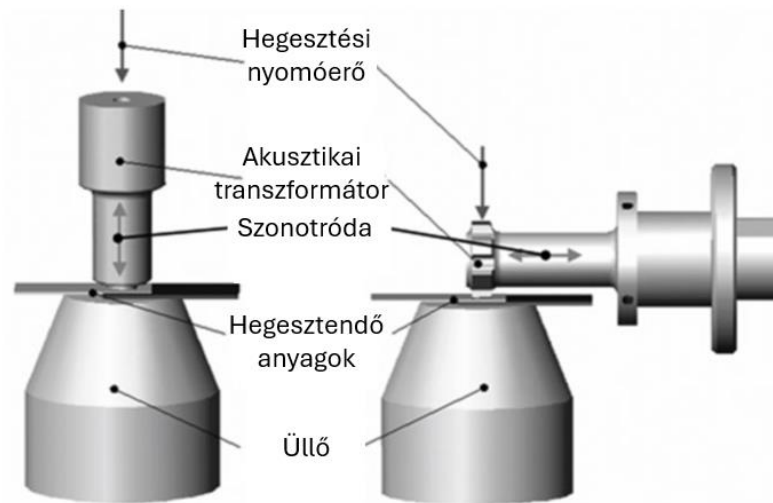
hozaganyag megömlesztve kerül a varratérbe, a nyomás biztosítása csúszó saruval történik, ezzel javítva a varrat felületét. Ezen eljárás nagyobb térfogatú varratok kitöltését teszi lehetővé [5].

A sugárzásos hegesztési eljárások fő technológiája polimerek esetén a lézersugaras hegesztés (lásd 5. ábra). A hegesztéshez 0,8-1,1 μm -es hullámhosszú változatait alkalmazzák. Főbb típusai: diódlézer, Nd:YAG, rubin, illetve gázlézerek(CO_2). Az anyag abszorpciós tényezője nagyban befolyásolja a hegesztés kimenetét. Átlapolt lézersugaras hegesztés során a felül lévő lemezen a lézersugár áthatol, viszont az alsó lemez már nem ereszti át a sugárzást, hanem elnyeli azt [6].



5.ábra: A transzmissziós lézerhegesztés elvi ábrája [7]

A surlódásos hegesztési eljárások közül az ultrahangos hegesztési eljárást (lásd 6. ábra) érdemes kiemelni műanyagok esetében. Az ultrahang 20kHz, azaz tartományának alja, az emberi füllel nem hallható. Az ultrahangos hegesztéshez relatívan kis energiabevitelre van szükség, rövid hegesztési idő alatt. Működési alapja az ultrahang által keltett rezgés miatt létrejövő súrlódás. A hálózati 50/50 Hz-es frekvenciát 15, 20, 30, akár 40 kHz-re alakítja, majd ezt a villamos jelet mechanikai rezgéssé alakítja. Ezt a rezgést a szonotróda adja át a hegesztetni kívánt anyagnak. Az így továbbított rezgési energia súrlódásként jelentkezik. Az eljárás feltétele az, hogy a polimer csillapítsa a mechanikai rezgéseket. A hegeszthetőség ezen feltétele minden hőre lágyuló műanyag esetében fennáll [8].

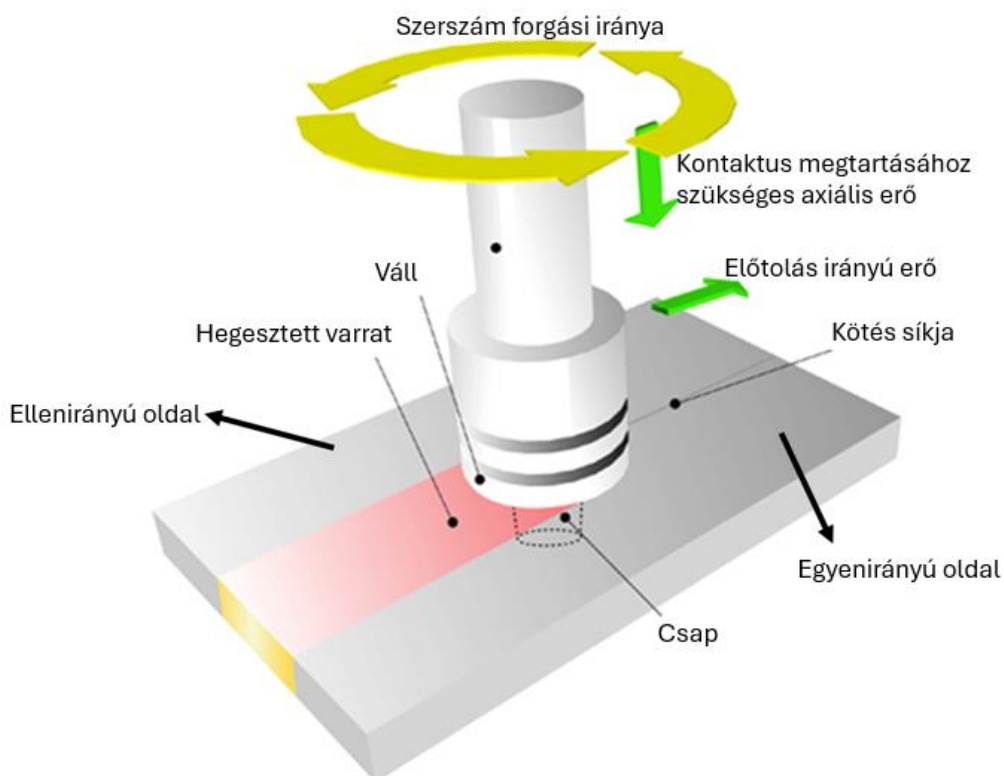


6. ábra: Az ultrahangos hegesztési módszer ábrája [8]

Egy másik súrlódásos hegesztési eljárás a rotációs dörzshegesztés alatt a két munkadarab befogása után az egyiket nagy fordulatszámon megforgatják, majd a másikra rányomják megfelelő erővel, a súrlódás hatására hő keletkezik. Megfelelő hőmérséklet elérése után az anyag megolvad. A forgó munkadarab forgását megszüntetik, majd a munkadarabot kontrolláltan lehűtik [5].

2.5 Polimerek kavarási dörzshegesztése

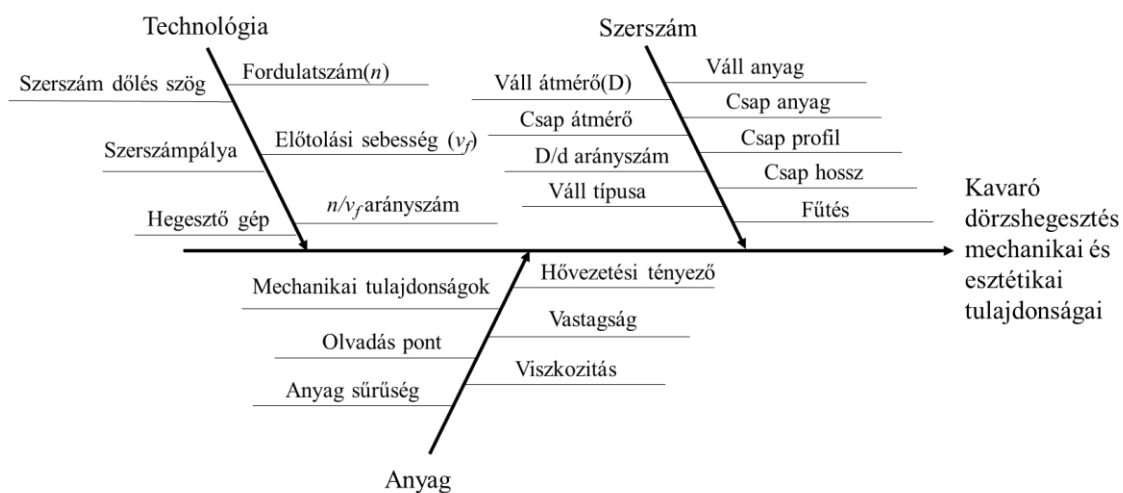
Kavarási dörzshegesztés során egy forgó szerszámmal haladnak végig a két hegesztendő alapanyag között. A szerszám egy csapból, illetve egy vállból áll. A szerszámoknak fűtött konstrukciója is alkalmazható, ezzel többlet hőt vezetve a hegesztési zónába [8]. A csap, illetve a váll méretének megfelelő megválasztása kiemelten fontos szerepet kap. A szerszám csap része dolgozik, azaz olvasztja meg az alapanyagot. nagy fordulatszáma segítségével az alapanyaggal súrlódás révén hőt termel, így az alapanyag ennek hatására megolvad. Olvadék állapotban a forgó mozgás meg is keveri az ömledéket. A szerszám kiemelése után (végkráter). Az eljárás nem követeli meg hozaganyag adagolását, védőgáz használata nem szükséges. A kavarási dörzshegesztést, illetve az eljárás közben fellépő fontosabb erőket a 7. ábra mutatja be.



7.ábra Kavaró dörzshegesztés sematikus ábrája [9]

A kavaró dörzshegesztett varratok mechanikai és esztétikai minőségét számos bemeneti paraméter befolyásolja. Az eljárás legfontosabb jellemzője, hogy rendkívül egyszerű elven működik, viszont ennek ellenére rengeteg paraméterrel rendelkezik.

A kavaró dörzshegesztés paramétereit a 8. ábra részletezi.



8.ábra Kavaró dörzshegesztés paramétereit

2.6 Hőmérséklet fontossága

A megfelelő kötés létrehozásához kiemelten fontos a megfelelő hegesztési hőmérséklet megválasztása. A hegesztési hőmérséklet polimerek hegesztése során egy érzékenyebb paraméter, mivel a polimerek hővezetési tényezője jelentősen alacsonyabb, mint a fémeké. Sergio Antonio Muñoz Pinzón [11] természetes gáz szállítására alkalmas 160 mm-es átmérőjű polietilén (PE100) csövek kavarási dörzshegesztését vizsgálta. Kísérletei során álló vállal rendelkező, balmenetes M6-os csappal rendelkező szerszámmal alkalmazott, a forgóvállú esetében 12°-os kúpszögű csapot alkalmazott. Próbákat végzett több fordulatszámon. A fordulatszám növekedésével a keletkező súrlódás végett arányosan nő a hegesztési hőmérséklet is. 600 1/perc-es fordulatszámon nem történt meg a megfelelő beolvadás. 1000 1/perc-es fordulatszámon megfelelő kötés alakult ki, viszont 3000 1/perc-es fordulatszámon erősebb gyökátfolyás valósult meg. Kötéshibák legnagyobb előfordulási helye az egyen, illetve ellenirányú oldal kötéssel érintkező része, mivel itt jelentős hőmérsékletkülönbség van jelen. Ezen hegesztési hibákról STM mikroszkópos képeket készített. A polimerek hegesztése során fellépő hőmérsékletet vizsgálni szükséges, annak megfelelő beállításával garantálható az iparban kritikus területeken való alkalmazása [11].

2.7 Hőmérséklet mérése

Hőmérsékletmérési eljárásoknak két főbb csoportja van: Kontakt és kontaktmentes hőmérés. A kontakt mérés során egy hőelemet helyezünk el a mérni kívánt tárgyon. Ennek a hőelemnek az elhelyezése problémás lenne a hegesztési zónában. Ugyan voltak törekvések polimerhegesztések során a kontakt mérés megvalósítására, de ezek nem tudtak megfelelő pontossággal mérési eredményeket adni. Ennek legfőbb oka a polimerek rossz hővezetési tényezője, illetve a hőelem elhelyezése. Hegesztési zónában történő mérésre alkalmas a hőkamerás eljárás, mivel az egy kontaktmentes mérési módszer. Hőkamerás mérés során fontos a paraméterek jó beállítása. A megfelelően beállított értékekkel pontos mérési eredményt tudunk kapni.

Az Infravörös Termográfia (IRT) során infravörös (IR) képeket készítenek hőkamerákkal.

A fény ezen tartományát az emberi szem nem képes látni, ezért mérő eszközök használata szükséges [12]. Ezen típusú mérés roncsolásmentes vizsgálati eljárások közé tartozik. Az eszköz pontos mérési eredményéhez kalibrálásán túl a környezeti hőmérséklet, légáramlás, illetve páratartalom is a mérést befolyásoló tényező. Ezen környezeti tényezők csökkentése érdekében az IRT eljárást ellenőrzött környezetben kell végezni. Az IRT eljárásnak két módja van: aktív és passzív. Passzív IRT során a céltárgy felől érkező sugárzás külső hőszugárzás nélkül érkezik, ezzel képesek vagyunk hőmérsékletet mérni. Azonban aktív IRT alatt a mért munkadarab külső hőszugárzásnak van kitéve. Ezen hőszugárzás során az anyagban lévő két, illetve háromdimenziós szerkezeti hibák érzékelhetőek, mivel a szerkezeti hiba területén a hőmérséklet megnő a környezetéhez képest. Ezen hőmérsékletnövekedés a szerkezeti hiba rosszabb hővezetési tulajdonsága okozza [13].

A hőkamera a mért tárgy által kibocsátott infravörös sugárzást méri. Infravörös sugárzása minden testnek van, amelynek hőmérséklete 0Kelvin, azaz $-273,15^{\circ}\text{C}$ feletti. A tárgyak infravörös sugárzásának intenzitása, illetve hullámhossza arányosan növekszik az objektum hőmérsékletével [14].

Az objektumra csapódó energia eloszlásának három módja van: visszaverődés(ρ), transzmisszió(T), abszorpció(α). Ezen paraméterek hullámhosszfüggőek, továbbá összegük minden esetben egy kell, hogy legyen, mivel energia nem veszik el [15].

$$\alpha_{\lambda} + T_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad (1)$$

Átlátszatlan anyagok esetében a transzmisszió szinte 0, tehát a képlet annak kihagyásával módosítható [15].

$$\alpha_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} \quad (2)$$

Amennyiben egy anyagnak a transzmissziója(T), illetve a visszaverődése(ρ) is 0, annak abszorpciós képessége 1 kell, hogy legyen. Ezen tulajdonságokkal rendelkező tárgyakat feketetestnek nevezzük. A Kirchhoff-törvény szerint bármely anyag emissziós és abszorpciós képessége azonos bármely meghatározott hőmérsékleten és hullámhosszon [15].

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \quad (3)$$

Szürketesteknek nevezzük azokat az objektumokat, melyek emissziós tényezője állandó, továbbá hullámhossztól független. Valós objektumok emissziós tényezője nem állandó, illetve hullámhosszfüggő, de ha elég kis hullámhossz intervallumon vizsgáljuk, akkor abban az esetben az emissziós tényezőt akár állandónak is tekinthetjük. Ezen elv alapján a valós objektumokat is kezelhetjük szürketestként. A szürketestek a velük egyenértékű feketetest által kibocsátott hőenergiának csak egy részét bocsátják ki, ezért ezen testek emissziós tényezője mindig kisebb kell, hogy legyen, mint egy, továbbá a visszaverőképesség nagyobb, mint nulla. Ezen gondolat alapján a képlet módosul.

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} \quad (4)$$

Hőkamerás kép készítése során a kamera kéri az emissziós tényező beállítását. Ezen objektumot jellemző mennyiség ismerete nélkül nem lehetne pontos eredménnyel véghez vinni a mérést [15].

Az American Society for Testing and Materials (ASTM) két mérési módszert javasol az emissziós tényező meghatározására melyek a Kontakt, illetve érintésmentes mérések.

Kontakt hőmérés során a vizsgált objektum felületét folyamatosan mérjük, így tudjuk annak valós hőmérsékletét, majd ez után hőkamerával is elkezdjük mérni a felületet. Addig szükséges a hőkamerán az emissziós tényező állítása, ameddig a kontakt, illetve hőkamerás hőmérsékleti érték meg nem egyezik. Fontos, hogy a mérési pont ne mozduljon el a két mérés között. A mérés legalább háromszori megismétlése után a beállított emissziós értékek átlagának számítása után megkapjuk az átlagos emissziós tényezőt.

Érintésmentes mérési módszer alkalmazása során tárgytól megfelelő távolságra helyezzük a hőkamerát, majd beállítjuk a mérési pontot, ahol az emissziós tényezőt kívánjuk mérni. A mért test felületére olyan felületmódosító anyagot szükséges felvinni, melynek emissziós tényezője ismert. Ezen anyag megfelelően kell, hogy legyen rögzítve, teljes kontaktussal, illetve meg kell bizonyosodni szárazságáról. A hőkamera mérés során alkalmazott emissziós értékét a felületmódosító anyag emissziós tényezőjére kell állítani. Ezután a mért értéket feljegyezzük. A módosítatlan felületen is elvégezzük a mérést. Addig állítjuk a hőkamerán az emissziós tényező értékét, ameddig az meg nem egyezik a módosított felületen mérttel, majd feljegyezzük azt. Legalább három mérés elvégzése után a kapott tényezőket átlagoljuk, ebből megkapjuk az átlagos emissziós tényezőt [16].

3. Anyagok és módszer

3.1 Vizsgált polipropilén anyag

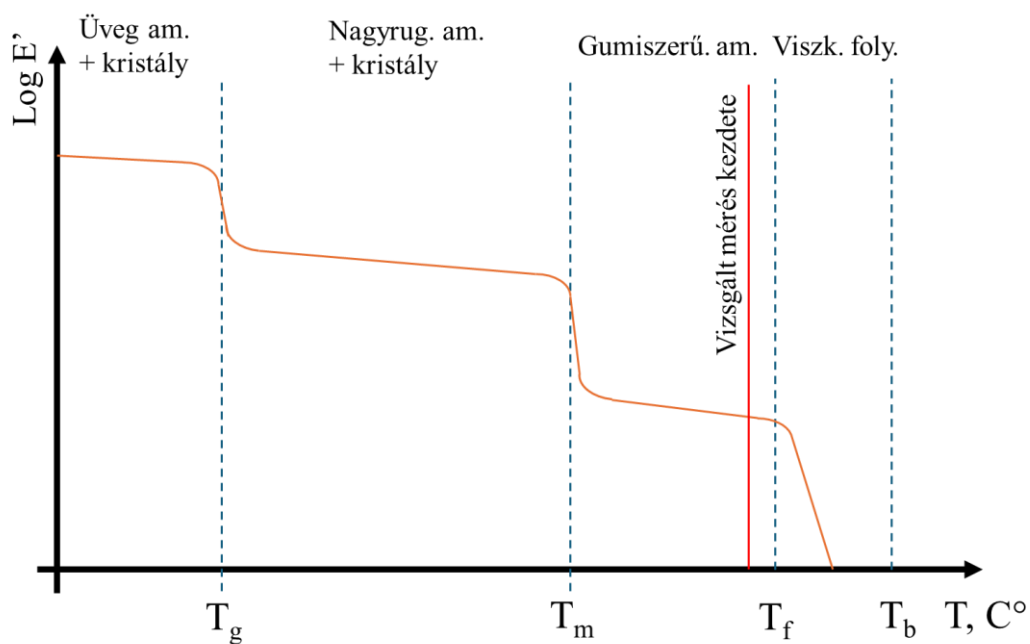
A vizsgált anyagnak olyan anyagot próbáltam találni, melyet széleskörűen alkalmaznak ipari környezetben. Erre az egyik legalkalmasabb anyag a polipropilén, mivel a polimerek közül az egyik legköltséghatékonyabb, illetve jó anyagjellemzőkkel rendelkező anyag. Kiemelkedően vegyszerálló, így alkalmazható vegyipari tartályokhoz, galvántechnológiai tartályokhoz, továbbá vegyipari tárolóedényként is. Időjárásnak jól ellenáll, elektromosan jól szigetel, de igény esetén létezik vezetőképes kivitelben is. További fontos anyagjellemző a megmunkálhatósága: Jól megmunkálható különböző forgácsolási eljárásokkal, illetve hegeszthető is. [17]

A választás így a DOCAPRÉN H erősítetlen, töltetmentes Polipropilén homopolimerre esett. A vizsgált anyag tulajdonságai az 1. táblázatban látható.

1. táblázat vizsgált anyag mechanikai és termikus tulajdonságai [17]

Tulajdonság	Vizsgálat	Mértékegység	Érték
Sűrűség	DIN EN ISO 1183	g/cm ³	0,91
Vízfelvétel: telítettség levegőn, 24 h / 96 h, (23°C)	DIN EN ISO 62	%	<0,1
Olvadáspont	ISO 11357-3	°C	165
Hővezetési tényező	ISO 22007-4:2008		0,2
Fajhő	ISO 22007-4:2008		1,7
Folyáshatár	DIN EN ISO 527-2	MPa	32
Húzószilárdság	DIN EN ISO 527-2	MPa	32
Szakadási nyúlás	DIN EN ISO 527-2	%	>50
Shore D keménység	DIN EN ISO 179-1eA		72

A munkadarabot 220 °C-ra hevítettük a kemencében, ez a polipropilén feldolgozási hőmérséklete alatt van, viszont a kristályolvadási hőmérséklet (T_m) pontja felett. Ennek következtében gumyszerű amorf lett az anyag állapota. A szakirodalom alapján a polipropilén hegesztése során alkalmazott hegesztési hőmérséklet is ebben a tartományban helyezkedik el.



9. ábra: A vizsgált PP-hez hasonló részben kristályos polimerekre jellemző DMA görbe

3.2 Bosch GTC 400 C

Az alkalmazott eszköz egy Bosch GTC 400 C- típusú hőkamera volt. Az eszköz IP53-as védelmi fokozattal rendelkezik, továbbá a mérések megkönnyítéséhez elemes, illetve 12V-os akkumulátoros megáplálást is enged. 160x120-as mátrixú szenzoron képes képet készíteni, tehát 1920 mérési ponton, továbbá szinte valós időben tudja megjeleníteni 3,5"-os kijelzőjén. Kép a képben (PIP) technológiájával a valós képet, illetve a hőképet egymásra illeszti, ezáltal könnyebb kiértékelést tesz lehetővé. Mérési tartománya $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti, ezáltal a méréshez megfelelő. Mérési pontossága $\pm 3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Látómezője $53\times 43\text{ }^{\circ}$ -os [18].

A rögzített képek kiértékelését akár helyileg az eszközön, de igény esetén számítógépen is lehet végezni a GTC TRANSFER szoftver segítségével, ezzel növelve a hatékonyságot [19].



10. ábra: Bosch GTC 400 C hőkamera

3.3 Testo emissziós szalag

Olyan felületmódosító anyagra volt szükség, amely a hőt az alapanyaggal szinte azonos módon képes áteresztetni, mivel a mérések csak úgy lehetnek pontosak, ahogyan végbemegy az anyag hűlése. Ezen feltételt a választott termék kielégíti, továbbá könnyen méretre is vágható, ezzel lehetővé téve, hogy a munkadarabon csak ott legyen, ahol valóban szükség van rá.

10 méter hosszú, 25mm széles, vágható.

Emissziós tényezője ismert (ϵ) = 0,95

Hőmérsékletnek ellenáll +250°C-ig

Tükröződő felületek méréséhez is alkalmas[20].



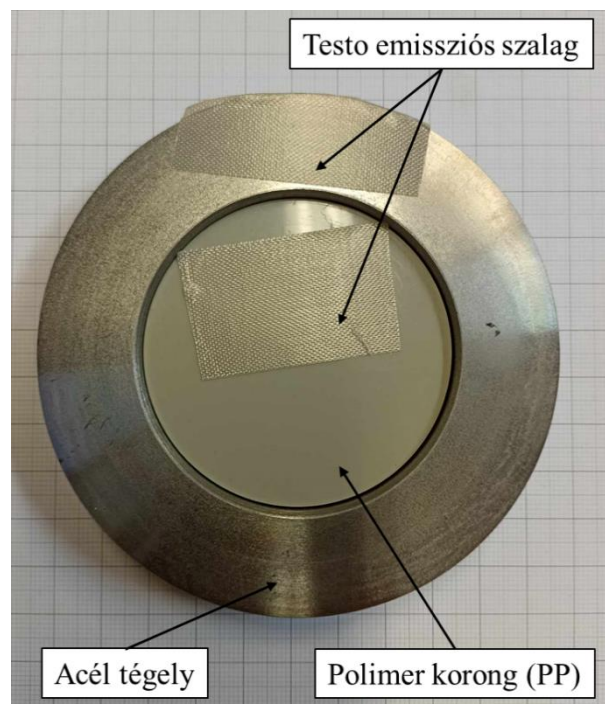
11. ábra: Testo emissziós szalag

3.4 Mérési elrendezés

Az acél tégely C45 minőségű acélból esztergált 100mm átmérőjű, melynek közepén egy 61mm átmérőjű 8mm mély furat lett kimunkálva.

A polipropilén próbatest 4 mm vastag, átmérője 60 mm.

Ez után a korongra, illetve a tégelyre is 0.95-ös emissziós tényezőjű Testo emissziós szalagot ragasztottam. A tégely, illetve az abba behelyezett polimer korong a 10. ábrán látható



12. ábra: A mérések során használt acél tégely, polimer korong és emissziós szalag

3.5 Mérés menete

A mérés helyszíne az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar 1081 Budapest, Népszínház u. 8., P30-as Hőkezelő laboratóriuma. A környező hőmérséklet 23°C volt.

A kemence 220°C -ra történő felfűtése után az acéltégelyt a koronggal együtt a kemencébe helyeztem, majd 2 órával később kivettem tűzifogó segítségével. Gondoskodni kellett a besugárzó napfény megszüntetéséről, mivel az torzította volna a mért eredményeket. A képeket a hőkamerával 0,95-re állított emissziós tényezővel készítettem, tehát a szalagon valós hőmérsékleti adatokat láttam. Ezen mért hőmérsékletek később célhőmérsékletként szolgáltak. A felvételeket a lehűlési folyamatról $47,6^{\circ}\text{C}$ -ig készítettem. A felvételek kiértékelése a Bosch GTC Transfer Software segítségével történt.

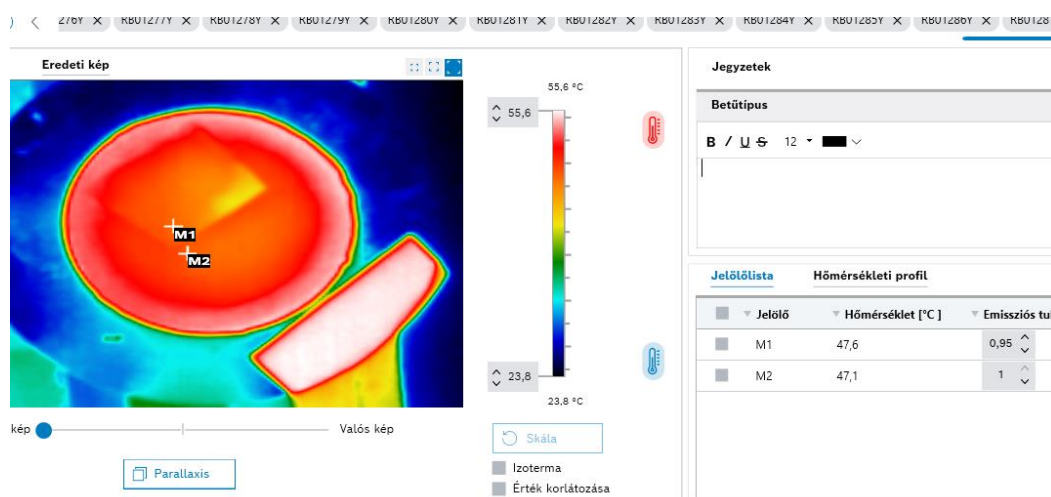


13.ábra: Mérés során készülő hőkamerás kép

3.6 Mérések kiértékelése a GTC Transfer szoftverrel.

Az IRT eljárás során készült képek kiértékelésében a Bosch GTC Transfer szoftverrel végeztem. A szoftver 36 nyelven elérhető, csak Windows rendszert támogat. A hőképek két állományból állnak, egy képen a hőmérsékleti adatok találhatóak, a másik állomány pedig egy sima kép. A képek szoftverbe történő importálása után a hőmérsékletmérési pontokat szabadon választhatjuk ki. A mérési pont kiválasztása után a pont emissziós tényezője szabadon állítható, ezzel a hőmérsékletet korrigálva. A hőképen a mutatott hőmérséklet felső, illetve alsó határértéke szabadon állítható, így a köztes hőmérsékleteket színkódolással jelöli. Képes a minimum, illetve maximum hőmérséklet kijelzésére is [21].

A GTC Transfer-ben kiolvasott adatok Microsoft Excel táblázatos formában jegyzése után a mérési pontokat grafikonon ábrázoltam.



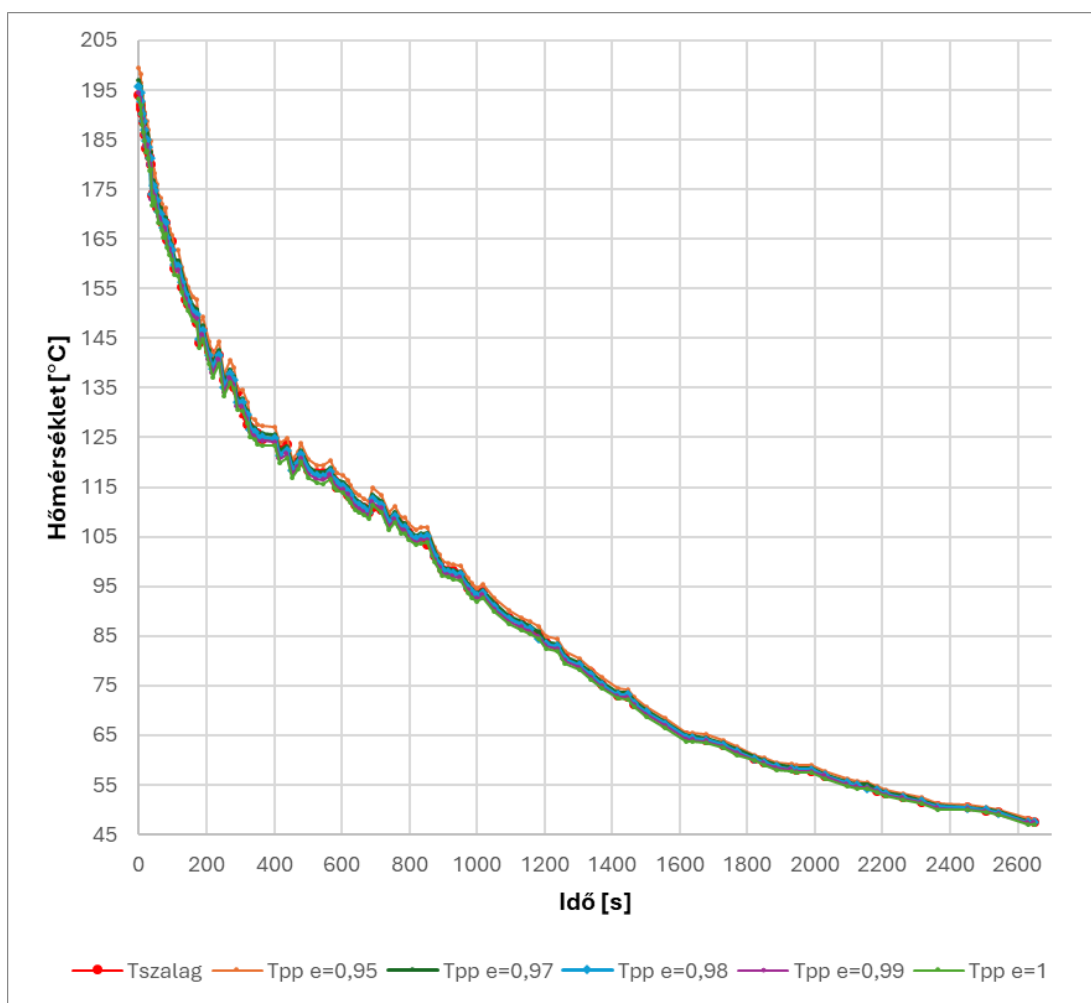
14. ábra Szoftver alkalmazása a mérés kiértékelése során

Az emissziós szalagon mért hőmérsékleti értéke pontos volt, hiszen ott a beállított emissziós tényező megegyezett a felületmódosító anyagével (0,95). A tiszta polimer felületen mért hőmérsékleti értékhez tartozó emissziós tényezőjének állítását addig végeztem, ameddig az legjobban meg nem közelítette a célhőmérsékletet. Mivel a tiszta polimer minden esetben magasabb hőmérsékletű volt, mint a felületmódosított anyag így minden egyes emissziós tényező értéke 0,95 feletti

A 0,95-1 közötti emissziós értékeket táblázatba foglaltam minden hőmérsékletmérési képhez, annak időpontjával, illetve azonosítójával a későbbi könnyű azonosítás érdekében.

4. Eredmények bemutatása

A hőmérsékleti értékek [0,95-1] intervallumon történő mérésének eredménye a hűlési idejének függvényében a 15. ábrán figyelhető meg.

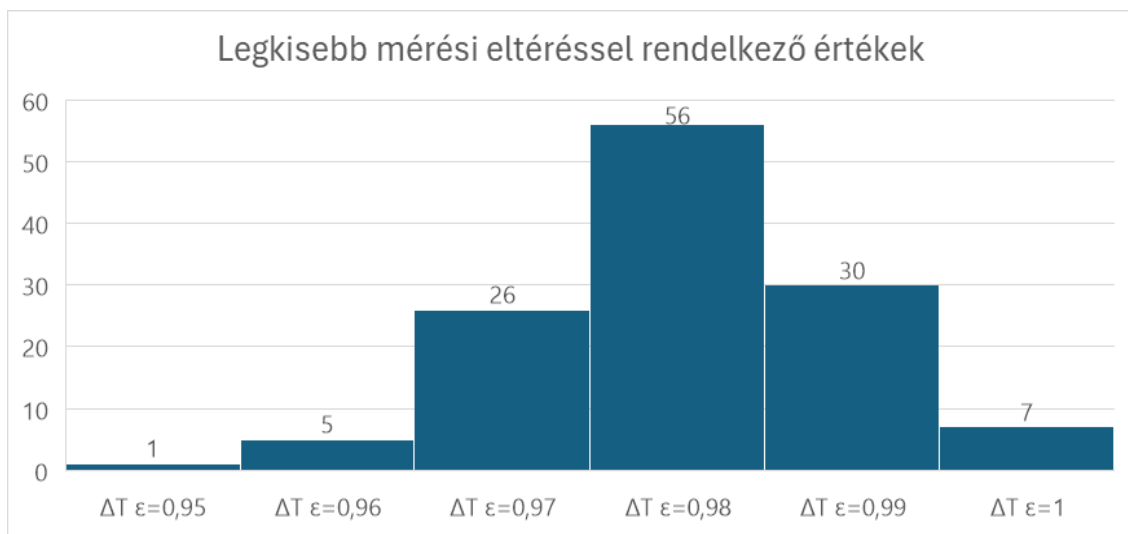


15.ábra: Hőmérsékleti értékek 0,95-1 emissziós tényező esetén idő függvényében.

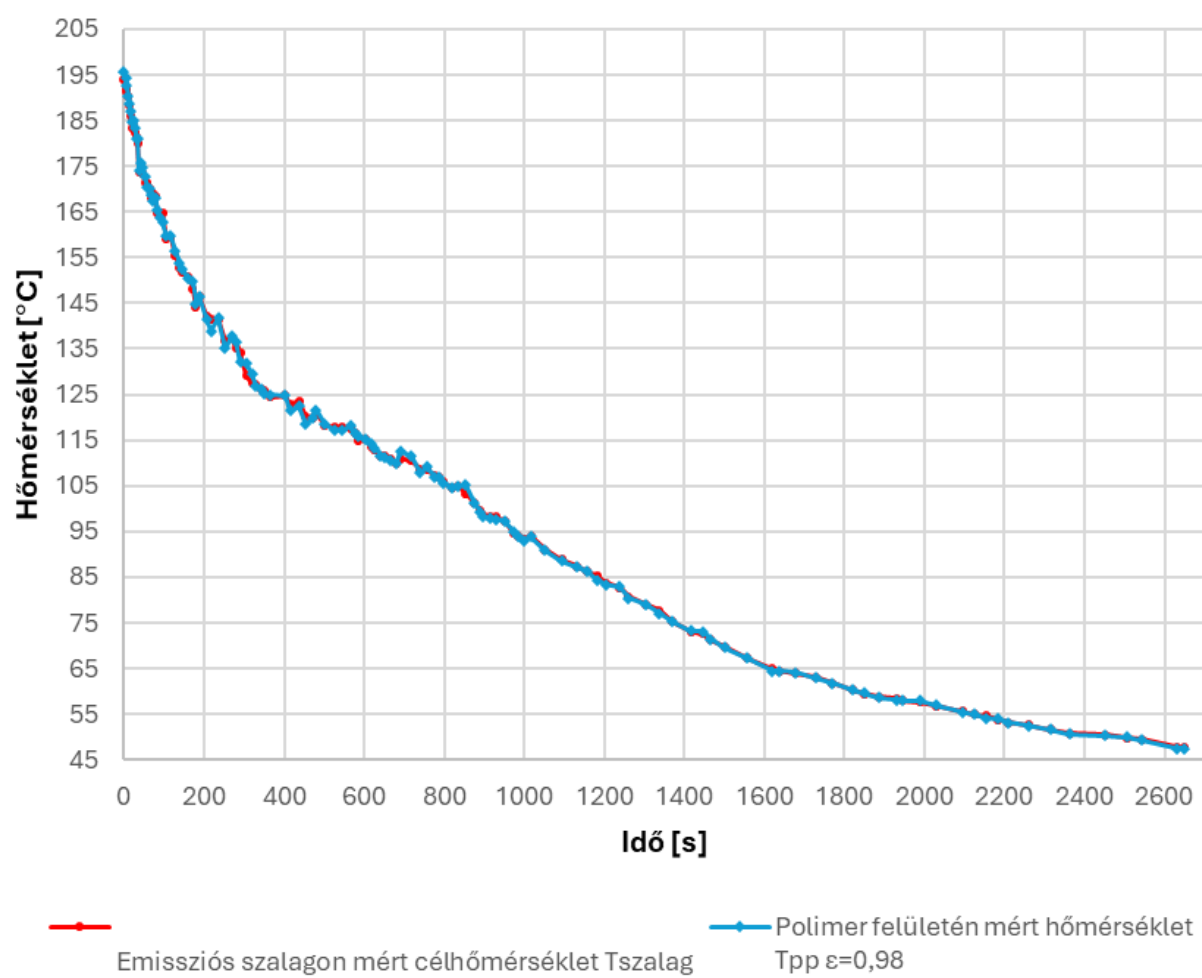
A célhőmérséklettől a legkisebb mértékben eltérő értékek emissziós tényezője megfigyelhető a 16. ábrán. Az ábra Gauss (standard) eloszlás képére hasonlít. A mérési eredmények standard eloszlása a polipropilén emissziós tényezőjének mérésével kapcsolatos természetes szórásból és a mérés technikai sajátosságokból fakad. A normális eloszlás bemutatja, hogy az adatok többsége az átlagérték körül helyezkedik el, kisebb részük pedig ettől távolabb, szimmetrikusan oszlik el. Az egyes mért értékek kisebb-nagyobb mértékben eltérnek az átlagértéktől, ami a mérőműszer pontosságából, a polimer

felületének esetleges apró eltéréseiből, valamint a környezeti tényezők (például hőmérséklet, páratartalom) hatásaiból adódhat. Ez a minta gyakran figyelhető meg akkor, amikor a vizsgálati paraméterek jól definiáltak, és a mérési környezet stabil.

A 16. ábra alapján, és a legkisebb eltérések végett a 0,98-es emissziós tényezővel módosított értékek állnak legközelebb a célhőmérséklethez. Összehasonlításuk a 17. ábrán található.



16. ábra: Célhőmérséklethez legközelebbi értékekhez tartozó emissziós tényezőjének ábrázolása hisztogramon,



17.ábra: emissziós szalagon, illetve polimeren 0,98-as emissziós tényezővel mért értékek összehasonlítása

5. Összefoglalás

A hegesztési folyamatok sikerességét alapvetően meghatározza a hegesztés során alkalmazott hőmérséklet, amely közvetlenül befolyásolja a kötés minőségét. A dolgozat a polimerek hegesztési technológiáinak részletes áttekintésével kezdődött, különös tekintettel a kavarási dörzshegesztésre, amely egy viszonylag új és ígéretes eljárás a polimerek és hőre lágyuló kompozit anyagok hegesztésére. Az eljárás működési elve, bemeneti paraméterei, valamint a hőmérséklet szerepe részletesen ismertetésre került. Kavarási dörzshegesztés során a megfelelő hőmérsékleti tartomány biztosítása kritikus a kötés jósfoka szempontjából.

A dolgozat kutatási témája a polipropilén lemez emissziós tényezőjének meghatározása volt. A hőkamerás mérések alkalmazása lehetőséget biztosít a hegesztési zónában található ömledék hőmérsékletének érintésmentes mérésére. A pontos hőmérséklet tudatában a hegesztési folyamat minősége jelentős mértékben javítható.

A vizsgálathoz választott polipropilén anyag széleskörű ipari alkalmazhatósága és kedvező anyagtulajdonságai miatt került kiválasztásra. A kutatás során az alkalmazott anyag a DOCAPRÉN H nevű polipropilén homopolimer volt, amely kiváló vegyszerállósággal és jó megmunkálhatósággal rendelkezik. Az emissziós tényező mérése az ASTM szabványa által ajánlott mérési eljárás szerint valósult meg. A hőmérséklet mérése során egy Bosch GTC 400 C típusú hőkamerával történt, amelynek pontossága és széles hőmérsékletmérési tartománya megfelelőnek bizonyult a vizsgálat követelményeihez.

A mérések eredményeként a polipropilén objektum emissziós tényezője 0,98 lett, ennek tudatában az objektumon a hőmérséklet pontosan mérhető.

A kutatás megállapította, hogy a polipropilén emissziós tényezőjének pontos ismerete lehetővé teszi a hőmérséklet pontos mérését a hegesztési folyamat során. A hegesztési zónában lévő hőmérséklet tudatában a hegesztési folyamat során akár valós időben állíthatóvá válnak a gépi paraméterek, így azokat szabályozva törekedve a tökéletes varratra.

6. Summary

The success of welding processes is largely dependent on the temperature used during the welding process, which directly affects the quality and durability of the joint. The thesis started with a detailed review of welding technologies for polymers, with particular emphasis on friction stir welding. It is a relatively new and promising process for welding polymers and thermoplastic composites. The principle of operation, input parameters and the importance of the temperature are described in detail. During friction stir welding, the adequate temperature is critical for the quality of the joint.

The research topic of this thesis was the measurement of the emissivity of a polypropylene sheet. The use of thermal imaging measurements provides the possibility of contactless measurement of the temperature of weld zone. Knowing the exact temperature can significantly improve the quality of the welding process.

The polypropylene material was selected for the study due to its wide industrial application and favourable material properties. The polypropylene homopolymer DOCAPREN H was used in the research, which has excellent chemical resistance and good machinability. For the measurement of the emissivity, the measurement procedure recommended by the ASTM standard was used. The temperature was measured using a Bosch GTC 400 C thermal imaging camera, whose accuracy and wide temperature measurement range were found to be adequate for the test requirements.

The measurements resulted in an emission coefficient of 0.98 for the polypropylene object, which means that the temperature of the object can be measured accurately.

The research concluded that accurate knowledge of the emissivity of polypropylene object allows accurate measurement of the temperature during the welding process. Being aware of the temperature in the welding zone, the machine parameters can be adjusted in real time during the welding process, thus changing them in order to achieve a perfect weld.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/10/PE-PLASTICS-THE-FACTS_V7-Tue_19-10-1.pdf
- [2] <https://machining-quote.com/bolg/abs-vs-pp-plastic-car-parts/>
- [3] Kumar, Sudhir & Medhi, Tanmoy & Saha Roy, Barnik. (2019). Friction Stir Welding of Thermoplastic Composites. 10.1007/978-981-13-6412-9_21.]
- [4] Iftikhar, S.H.; Mourad, A.-H.I.; Sheikh-Ahmad, J.; Almaskari, F.; Vincent, S. A Comprehensive Review on Optimal Welding Conditions for Friction Stir Welding of Thermoplastic Polymers and Their Composites. *Polymers* 2021, 13, 1208.
- [5] http://www.pt.bme.hu/segedletek/b5_kotesek_2015.pdf
- [6] N. Kumar, R. Sherlock, D. Tormey, Prediction of Weld Interface Depth and Width at Optimum Laser Welding Temperature for Polypropylene, *Procedia CIRP*, Volume 81, 2019, p 1272-1277
- [7] <https://akro-plastic.com/de/compounds/akrotek-pk/>
- [8] Li, H., Chen, C., Yi, R. et al. Ultrasonic welding of fiber-reinforced thermoplastic composites: a review. *Int J Adv Manuf Technol* 120, 29–57 (2022).
- [9] Mishra, Akshansh & Sharma, Abhishek & Nidigonda, Gopikrishna. (2018). A Review on the effect of Cryogenic treatment on the mechanical properties of Friction Stir Welded Joints. 10.13140/RG.2.2.11220.50564.
- [10] Czigány, T., Kiss, Z. "Friction stir welding of fiber reinforced polymer composites", In: *Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials (ICCM)*, Jeju, South Korea, 2011, pp. 21–26.
- [11] Sergio Antonio Muñoz Pinzón: *Soldadura Por Fricción Batido De Tuberías De Polietileno Para Gas Natural* Lima, Perú. 2014
- [12] Usamentiaga, R.; Venegas, P.; Guerediaga, J.; Vega, L.; Molleda, J.; Bulnes, F.G. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors* 2014, 14, 12305-12348.
- [13] <https://infotechnology.fhwa.dot.gov/active-infrared-thermography-irt-2/>
- [14] ElSheikh, A., Abu-Nabah, B. A., Hamdan, M. O., & Tian, G. Y. (2023). Infrared camera geometric calibration: a review and a precise thermal radiation checkerboard target. *Sensors*, 23(7), 3479.

- [15] Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7), 12305-12348.
- [16] ASTM, E. (2010). 99a," Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers. American Society for Testing and Materials, Pennsylvania (USA).]
- [17] <https://quattroplast.hu/termek/docapren-h/>
- [18] Bodor Géza - Vas László M. POLIMER ANYAGTUDOMANY Szilárd polimerek szerkezete es mechanikai viselkedése Budapest, 1999
- [19] <https://www.bosch-professional.com/hu/hu/products/gtc-400-c-0601083108>
- [20] https://uk.rs-online.com/web/p/thermometer-accessories/1252269?srsId=AfmBOorcTlrYsFcyA_V-XtMCz8d_NKPszlch-ua8iyVQbPmoT6lUKvU
- [21] <https://measuring-bosch.com/gtc-transfer-software/>

8. MELLÉKLETEK

1. sz. melléklet: Hőkamerás mérés részletes eredményei

Mérés kezdetétől eltelt idő Δt [s]	Emissziós szalagon mért célhőmérséklet Tszalag	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,95$	$\Delta T \varepsilon=0,95$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,96$	$\Delta T \varepsilon=0,96$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,97$	$\Delta T \varepsilon=0,97$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,98$	$\Delta T \varepsilon=0,98$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,99$	$\Delta T \varepsilon=0,99$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=1$	$\Delta T \varepsilon=1$
0	194,1	199,5	5,4	198,2	4,1	196,9	2,8	195,7	1,6	194,4	0,3	193,2	0,9
4	192	198,3	6,3	197	5	195,8	3,8	194,5	2,5	193,3	1,3	192,1	0,1
6	191,3	196,5	5,2	195,2	3,9	194	2,7	192,7	1,4	191,5	0,2	190,3	1
10	190,3	194	3,7	192,7	2,4	191,5	1,2	190,3	0	189,1	1,2	187,9	2,4
14	188,4	192,5	4,1	191,3	2,9	190	1,6	188,8	0,4	187,6	0,8	186,5	1,9
16	186,1	190,6	4,5	189,4	3,3	188,2	2,1	187	0,9	185,8	0,3	184,7	1,4
20	183,3	188,4	5,1	187,2	3,9	186	2,7	184,8	1,5	183,6	0,3	182,5	0,8
24	183,7	188,7	5	187,5	3,8	186,3	2,6	185,1	1,4	183,9	0,2	182,8	0,9
28	182,4	187,1	4,7	185,9	3,5	184,7	2,3	183,5	1,1	182,3	0,1	181,2	1,2
30	181,5	184,7	3,2	183,5	2	182,3	0,8	181,2	0,3	180	1,5	178,9	2,6
34	180,1	184,7	4,6	183,5	3,4	182,4	2,3	181,2	1,1	180,1	0	179	1,1
38	173,8	177,5	3,7	176,3	2,5	175,2	1,4	174,1	0,3	173	0,8	171,9	1,9
42	174,3	179,1	4,8	178	3,7	176,8	2,5	175,7	1,4	174,6	0,3	173,5	0,8
46	173,4	178,2	4,8	177	3,6	175,9	2,5	174,8	1,4	173,7	0,3	172,6	0,8
52	171,3	176,1	4,8	174,9	3,6	173,8	2,5	172,7	1,4	171,5	0,2	170,6	0,7
58	171,5	173,9	2,4	172,7	1,2	171,6	0,1	170,5	1	169,5	2	168,4	3,1
64	170,2	173,4	3,2	172,3	2,1	171,2	1	170,1	0,1	169,1	1,1	168	2,2
68	168,2	172	3,8	170,9	2,7	169,8	1,6	168,7	0,5	167,7	0,5	166,7	1,5
72	169	170,7	1,7	169,6	0,6	168,5	0,5	167,4	1,6	166,4	2,6	165,3	3,7

Mérés kezdetétől eltelt idő Δt [s]	Emissziós szalagon mért célhőmérséklet Tszalag	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,95$	$\Delta T \varepsilon=0,95$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,96$	$\Delta T \varepsilon=0,96$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,97$	$\Delta T \varepsilon=0,97$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,98$	$\Delta T \varepsilon=0,98$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,99$	$\Delta T \varepsilon=0,99$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=1$	$\Delta T \varepsilon=1$
78	168,4	171,4	3	170,3	1,9	169,2	0,8	168,2	0,2	167,1	1,3	166,1	2,3
84	164,8	168,6	3,8	167,5	2,7	166,5	1,7	165,4	0,6	164,4	0,4	163,4	1,4
90	164,2	167,1	2,9	166	1,8	164,9	0,7	163,9	0,3	162,9	1,3	161,9	2,3
96	164,6	165,8	1,2	164,8	0,2	163,7	0,9	162,7	1,9	161,7	2,9	160,7	3,9
106	159	162,8	3,8	161,7	2,7	160,7	1,7	159,7	0,7	158,7	0,3	157,7	1,3
116	159,3	162,7	3,4	161,6	2,3	160,6	1,3	159,6	0,3	158,6	0,7	157,6	1,7
128	155,4	159,4	4	158,4	3	157,4	2	156,4	1	155,4	0	154,4	1
138	152,8	156,9	4,1	155,9	3,1	154,9	2,1	153,9	1,1	153	0,2	152	0,8
146	151,7	155,3	3,6	154,4	2,7	153,4	1,7	152,4	0,7	151,5	0,2	150,5	1,2
160	150,9	153,3	2,4	152,3	1,4	151,3	0,4	150,4	0,5	149,4	1,5	148,5	2,4
172	148,1	152,8	4,7	151,8	3,7	150,8	2,7	149,9	1,8	148,9	0,8	148	0,1
178	144,1	147,7	3,6	146,7	2,6	145,8	1,7	144,9	0,8	144	0,1	143,1	1
188	146,5	149,4	2,9	148,4	1,9	147,5	1	146,6	0,1	145,7	0,8	144,8	1,7
206	142,3	144,3	2	143,4	1,1	142,5	0,2	141,6	0,7	140,7	1,6	139,8	2,5
218	141,6	141,6	0	140,7	0,9	139,8	1,8	138,9	2,7	138	3,6	137,2	4,4
236	141,5	144,4	2,9	143,5	2	142,5	1	141,7	0,2	140,8	0,7	139,9	1,6
252	136,7	137,6	0,9	136,7	0	135,8	0,9	135	1,7	134,1	2,6	133,3	3,4
268	137,6	140,5	2,9	139,6	2	138,7	1,1	137,8	0,2	137	0,6	136,2	1,4
280	135,2	139,1	3,9	138,2	3	137,4	2,2	136,5	1,3	135,7	0,5	134,8	0,4

Mérés kezdetétől eltelt idő Δt [s]	Emissziós szalagon mért célhőmérséklet Tszalag	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,95$	$\Delta T \varepsilon=0,95$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,96$	$\Delta T \varepsilon=0,96$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,97$	$\Delta T \varepsilon=0,97$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,98$	$\Delta T \varepsilon=0,98$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,99$	$\Delta T \varepsilon=0,99$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=1$	$\Delta T \varepsilon=1$
290	134	134,7	0,7	133,8	0,2	132,9	1,1	132,1	1,9	131,3	2,7	130,5	3,5
306	129,2	134,5	5,3	133,7	4,5	132,8	3,6	132	2,8	131,2	2	130,4	1,2
320	127,5	132	4,5	131,1	3,6	130,3	2,8	129,5	2	128,7	1,2	127,9	0,4
330	127,1	129,1	2	128,3	1,2	127,5	0,4	126,7	0,4	125,9	1,2	125,2	1,9
342	126,2	128,5	2,3	127,7	1,5	126,9	0,7	126,1	0,1	125,3	0,9	124,6	1,6
352	125,9	127,5	1,6	126,7	0,8	125,9	0	125,1	0,8	124,3	1,6	123,6	2,3
366	124,5	127,4	2,9	126,6	2,1	125,8	1,3	125	0,5	124,3	0,2	123,5	1
402	124,7	127,2	2,5	126,4	1,7	125,6	0,9	124,8	0,1	124,1	0,6	123,3	1,4
416	122,7	123,8	1,1	123	0,3	122,2	0,5	121,4	1,3	120,7	2	120	2,7
438	123,6	124,8	1,2	124	0,4	123,2	0,4	122,5	1,1	121,7	1,9	121	2,6
454	120,2	120,7	0,5	120	0,2	119,2	1	118,5	1,7	117,7	2,5	117	3,2
470	119,8	122,1	2,3	121,3	1,5	120,6	0,8	119,8	0	119,1	0,7	118,7	1,1
480	120,7	123,9	3,2	123,1	2,4	122,3	1,6	121,6	0,9	120,8	0,1	120,1	0,6
502	118,3	120,6	2,3	119,8	1,5	119,1	0,8	118,4	0,1	117,6	0,7	116,9	1,4
526	117,8	119,5	1,7	118,8	1	118	0,2	117,3	0,5	116,6	1,2	115,9	1,9
546	117,9	119,4	1,5	118,6	0,7	117,9	0	117,2	0,7	116,4	1,5	115,7	2,2
566	117,5	120,4	2,9	119,6	2,1	118,8	1,3	118,1	0,6	117,4	0,1	116,7	0,8
576	116,4	118,6	2,2	117,9	1,5	117,1	0,7	116,4	0	115,7	0,7	115	1,4
584	114,9	118	3,1	117,3	2,4	116,5	1,6	115,8	0,9	115,1	0,2	114,4	0,5

Mérés kezdetétől eltelt idő Δt [s]	Emissziós szalagon mért célhőmérséklet Tszalag	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,95$	$\Delta T \varepsilon=0,95$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,96$	$\Delta T \varepsilon=0,96$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,97$	$\Delta T \varepsilon=0,97$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,98$	$\Delta T \varepsilon=0,98$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,99$	$\Delta T \varepsilon=0,99$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=1$	$\Delta T \varepsilon=1$
604	115,2	117,4	2,2	116,7	1,5	115,9	0,7	115,2	0	114,5	0,7	113,8	1,4
618	113,4	116,3	2,9	115,6	2,2	114,8	1,4	114,1	0,7	113,4	0	112,7	0,7
626	112,9	115,4	2,5	114,7	1,8	114	1,1	113,3	0,4	112,6	0,3	111,9	1
640	111,4	113,9	2,5	113,1	1,7	112,4	1	111,7	0,3	111,1	0,3	110,4	1
652	111,5	113,4	1,9	114,1	2,6	112	0,5	111,3	0,2	110,6	0,9	110	1,5
664	110,9	112,7	1,8	112	1,1	111,3	0,4	110,7	0,2	110	0,9	109,3	1,6
682	109,9	112,1	2,2	111,4	1,5	110,7	0,8	110	0,1	109,3	0,6	108,7	1,2
690	110,9	114,8	3,9	114,1	3,2	113,4	2,5	112,7	1,8	112	1,1	111,3	0,4
718	110,5	113,5	3	112,8	2,3	112,1	1,6	111,4	0,9	110,7	0,2	110	0,5
740	108,6	109,8	1,2	109,1	0,5	108,4	0,2	107,8	0,8	107,1	1,5	106,5	2,1
756	108,5	111,2	2,7	110,6	2,1	109,9	1,4	109,2	0,7	108,5	0	107,9	0,6
776	107,3	109	1,7	108,3	1	107,7	0,4	107	0,3	106,4	0,9	105,7	1,6
786	106,9	109	2,1	108,4	1,5	107,7	0,8	107	0,1	106,4	0,5	105,7	1,2
796	105,8	107,6	1,8	107	1,2	106,3	0,5	105,7	0,1	105	0,8	104,4	1,4
818	104,6	106,5	1,9	105,9	1,3	105,2	0,6	104,6	0	103,9	0,7	103,3	1,3
836	104,9	107	2,1	106,3	1,4	105,6	0,7	105	0,1	104,4	0,5	103,7	1,2
854	103,3	107	3,7	106,4	3,1	105,7	2,4	105,1	1,8	104,4	1,1	103,8	0,5
876	101,1	102,9	1,8	102,3	1,2	101,7	0,6	101,1	0	100,4	0,7	99,9	1,2
890	99,7	101,3	1,6	100,7	1	100	0,3	99,4	0,3	98,8	0,9	98,2	1,5

Mérés kezdetétől eltelt idő Δt [s]	Emissziós szalagon mért célhőmérséklet Tszalag	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,95$	$\Delta T \varepsilon=0,95$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,96$	$\Delta T \varepsilon=0,96$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,97$	$\Delta T \varepsilon=0,97$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,98$	$\Delta T \varepsilon=0,98$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,99$	$\Delta T \varepsilon=0,99$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=1$	$\Delta T \varepsilon=1$
896	98,5	100,1	1,6	99,5	1	98,9	0,4	98,3	0,2	97,7	0,8	97,2	1,3
914	98,2	99,7	1,5	99,1	0,9	98,5	0,3	97,9	0,3	97,3	0,9	96,8	1,4
928	98,2	99,4	1,2	98,8	0,6	98,2	0	97,6	0,6	97	1,2	96,5	1,7
950	97,4	99,1	1,7	98,5	1,1	97,9	0,5	97,3	0,1	96,7	0,7	96,2	1,2
974	94,6	96,6	2	96	1,4	95,4	0,8	94,8	0,2	94,2	0,4	93,7	0,9
984	93,9	95,6	1,7	95	1,1	94,4	0,5	93,9	0	93,3	0,6	92,8	1,1
1000	93,4	94,8	1,4	94,2	0,8	93,6	0,2	93,1	0,3	92,5	0,9	92	1,4
1016	94	95,5	1,5	94,9	0,9	94,3	0,3	93,8	0,2	93,2	0,8	92,7	1,3
1052	91,1	92,6	1,5	92	0,9	91,5	0,4	90,9	0,2	90,4	0,7	89,9	1,2
1094	88,8	90,1	1,3	89,5	0,7	89	0,2	88,5	0,3	87,9	0,9	87,4	1,4
1132	87,4	88,8	1,4	88,3	0,9	87,8	0,4	87,2	0,2	86,7	0,7	86,2	1,2
1156	86,2	88	1,8	85,4	0,8	87	0,8	86,4	0,2	85,9	0,3	85,4	0,8
1182	85,3	86,9	1,6	86,4	1,1	85,9	0,6	84,4	0,9	84,9	0,4	84,4	0,9
1204	83,8	85	1,2	84,4	0,6	83,9	0,1	83,4	0,4	83	0,8	82,5	1,3
1238	82,7	84,4	1,7	83,9	1,2	83,4	0,7	82,9	0,2	82,4	0,3	81,9	0,8
1260	80,7	81,9	1,2	81,4	0,7	80,9	0,2	80,4	0,3	80	0,7	79,5	1,2
1302	79,1	80,5	1,4	80	0,9	79,6	0,5	79,1	0	78,6	0,5	78,2	0,9
1338	77,7	78,5	0,8	78	0,3	77,6	0,1	77,1	0,6	76,7	1	76,3	1,4
1370	75,3	76,6	1,3	76,1	0,8	75,7	0,4	75,2	0,1	74,8	0,5	74,4	0,9

Mérés kezdetétől eltelt idő Δt [s]	Emissziós szalagon mért célhőmérséklet Tszalag	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,95$	$\Delta T \varepsilon=0,95$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,96$	$\Delta T \varepsilon=0,96$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,97$	$\Delta T \varepsilon=0,97$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,98$	$\Delta T \varepsilon=0,98$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,99$	$\Delta T \varepsilon=0,99$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=1$	$\Delta T \varepsilon=1$
1416	73	74,5	1,5	74	1	73,6	0,6	73,2	0,2	72,8	0,2	72,4	0,6
1446	72,6	74,3	1,7	73,9	1,3	73,5	0,9	73,1	0,5	72,7	0,1	72,3	0,3
1466	71,3	72,6	1,3	72,2	0,9	71,8	0,5	71,4	0,1	71	0,3	70,6	0,7
1500	69,8	70,8	1	70,4	0,6	70	0,2	69,6	0,2	69,2	0,6	68,8	1
1558	67,3	68,4	1,1	68	0,7	67,7	0,4	67,3	0	66,9	0,4	66,6	0,7
1620	64,9	65,6	0,7	65,2	0,3	64,9	0	64,5	0,4	64,2	0,7	63,8	1,1
1638	64,5	65,5	1	65,1	0,6	64,8	0,3	64,4	0,1	64,1	0,4	63,8	0,7
1678	64	65,2	1,2	64,8	0,8	64,4	0,4	64,1	0,1	63,8	0,2	63,4	0,6
1728	63,1	64,1	1	63,7	0,6	63,4	0,3	63	0,1	62,7	0,4	62,4	0,7
1770	61,8	62,7	0,9	62,3	0,5	62	0,2	61,7	0,1	61,4	0,4	61	0,8
1822	60,2	61,1	0,9	60,8	0,6	60,5	0,3	60,2	0	59,9	0,3	59,9	0,3
1850	59,5	60,5	1	60,2	0,7	59,9	0,4	59,6	0,1	59,3	0,2	59	0,5
1886	58,8	59,6	0,8	59,3	0,5	59	0,2	58,7	0,1	58,4	0,4	58,1	0,7
1930	58,5	59,2	0,7	58,9	0,4	58,5	0	58,2	0,3	58	0,5	57,7	0,8
1946	57,9	58,9	1	58,6	0,7	58,3	0,4	58	0,1	57,7	0,2	57,4	0,5
1990	57,7	58,9	1,2	58,6	0,9	58,3	0,6	58	0,3	57,7	0	57,4	0,3
2028	56,8	57,8	1	57,4	0,6	57,2	0,4	56,9	0,1	56,8	0	56,3	0,5
2094	55,6	56,2	0,6	55,9	0,3	55,7	0,1	55,4	0,2	55,1	0,5	54,8	0,8
2124	54,9	55,7	0,8	55,4	0,5	55,1	0,2	54,9	0	54,6	0,3	54,3	0,6

Mérés kezdetétől eltelt idő Δt [s]	Emissziós szalagon mért célhőmérséklet Tszalag	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,95$	$\Delta T \varepsilon=0,95$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,96$	$\Delta T \varepsilon=0,96$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,97$	$\Delta T \varepsilon=0,97$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,98$	$\Delta T \varepsilon=0,98$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=0,99$	$\Delta T \varepsilon=0,99$	Polimer felületén mért hőmérséklet $T_{pp} \varepsilon=1$	$\Delta T \varepsilon=1$
2156	54,7	55,5	0,8	55,2	0,5	55	0,3	54,2	0,5	54,4	0,3	54,2	0,5
2184	53,8	54,7	0,9	54,5	0,7	54,2	0,4	53,9	0,1	53,7	0,1	53,4	0,4
2210	53,2	54	0,8	53,7	0,5	53,4	0,2	53,2	0	52,9	0,3	52,7	0,5
2260	52,6	53,3	0,7	53,1	0,5	52,8	0,2	52,5	0,1	52,3	0,3	52	0,6
2314	51,6	52,5	0,9	52,2	0,6	52	0,4	51,7	0,1	51,5	0,1	51,2	0,4
2362	50,8	51,3	0,5	51	0,2	50,8	0	50,6	0,2	50,3	0,5	50,1	0,7
2452	50,5	51	0,5	50,8	0,3	50,5	0	50,3	0,2	50,1	0,4	49,9	0,6
2506	49,8	50,6	0,8	50,3	0,5	50,1	0,3	49,9	0,1	49,7	0,1	49,4	0,4
2544	49,4	50	0,6	49,8	0,4	49,6	0,2	49,3	0,1	49,1	0,3	48,9	0,5
2630	47,8	48,2	0,4	48	0,2	47,7	0,1	47,5	0,3	47,3	0,5	47,1	0,7
2648	47,6	48,1	0,5	47,9	0,3	47,7	0,1	47,5	0,1	47,3	0,3	47,1	0,5