

A fuzzy logika alkalmazása a gumiiparban

Implementation of Fuzzy Logic in Tyre Industry

Magyari F. Attila*, Dineva Adrienn*

* Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország

attila.magyari@apollotyres.com, dineva.adrienn@nik.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A tanulmány bemutatja a fuzzy logika elméleti alapjait, valamint részletezi alkalmazását a gumiipar speciális folyamataiban. Két esettanulmány (membrán élettartam-optimalizálás és prészsorszám hőmérséklet-szabályozás) lépésről lépésre bemutatja a fuzzy rendszerek implementálását és potenciális eredményeit. A MATLAB Simulink segítségével a szimulációk alátámasztották a gyártási folyamatok hatékonyságának javulását, a selejtarány jelentős csökkentését és a költségek optimalizálását.

Kulcsszavak: fuzzy logika, szimuláció, okos vulkanizálás, membrán-élettartam előrejelzés

Abstract — The paper presents the theoretical foundations of fuzzy logic and details its application in specific processes within the rubber industry. Two case studies (membrane life optimization and press tool temperature control) demonstrate step-by-step the implementation of fuzzy systems and their potential results. With the help of MATLAB Simulink, the simulations confirmed the improvement of the efficiency of production processes, a significant reduction of the scrap rate and the optimization of costs.

Keywords: fuzzy logic simulation, smart curing, bladder lifetime prediction

1 BEVEZETÉS

A modern gumibroncs-gyártás rendkívül összetett, több tucatnyi független és egymással kölcsönhatásban álló paramétert tartalmaz. Az egyik legfontosabb tényező a vulkanizálási folyamat hőmérsékletprofilja, amely során a szerszám felületi hőmérséklete akár több tíz °C-kal is ingadozhat az üzemeltetési környezet és a gőzrendszer terheltségének függvényében. Emellett a relatív páratartalom változékonysága a gőzrendszerben, valamint az egyes gumioösszetevők (szintetikus kaucsuk, szilika, karbon) batch-batch között eltérő anyagminősége mind hozzájárulhat a vulkanizálás során keletkező belső feszültségek és selejtképződési mintázatok kialakulásához [2,3].

A hagyományos, kétértékű (ON/OFF) vezérlési rendszerek a gyakorlatban úgy szabályozzák a gőz- vagy elektromos fűtést, hogy előre definiált alsó és felső hőmérsékleti határok között kapcsolják be-ki a fűtést. Bár napjainkban az iparban főként PID szabályzást használnak, ez a megközelítés gyakran nem tudja kezelni a hőmérséklet-átmeneteket, a szenzorok mérési

bizonytalanságait és azt a tényt, hogy a gumi viszkoelasztikus viselkedése nem kapcsolható egyszerűen „hideg” vagy „forró” állapotokhoz. Ennek következtében a ciklusok között akár 5–8 °C-os ingadozás is előfordulhat, ami a vulkanizálás során, túl-, vagy alulvulkanizálást okozhat, és végső soron csökkentheti a termék mechanikai tulajdonságainak megbízhatóságát [4].

L. A. Zadeh 1965-ös *Fuzzy Sets* cikke tette lehetővé, hogy a vezérlőalgoritmusok ne kizárólag éles határértékekre támaszkodjanak, hanem valóságos mérési adatokban rejlő bizonytalanságokat és fokozatos átmeneteket is modellezhessék [1]. A fuzzy halmazelméletben minden mérési és szabályozási változóhoz (például „alacsony hőmérséklet”, „közepes páratartalom”) hozzárendelhető egy tagsági függvény, amely egy 0 és 1 közötti értékkel fejezi ki, hogy az aktuális mérés mennyire felel meg egy adott nyelvi kifejezésnek. [5].

A fuzzy logikát korábban sikerrel alkalmazták háztartási gépeken (mosógépek dobfordulatszama, vízlágyítás) és épületautomatizálásban (klíma- és világításvezérlés), amelyek esetében a felhasználói kényelem és az energiahatékonyság jelentős javulást mutatott [6,7]. Ezek a tapasztalatok meggyőzően alátámasztják, hogy a fuzzy rendszerek rugalmasan képesek kezelni a nemlineáris és bizonytalansággal terhelt folyamatrészeket.

A fuzzylogika-alapú rendszerek alkalmazása nem új keletű, de a mesterséges intelligencia jelenleg is zajló fejlődésével és a számítási teljesítmények növekedésével napjainkban újra középpontba kerültek. Számos ipari tanulmány és kísérleti modell igazolja, hogy a neuro-fuzzy rendszerek, a fizikai törvényekkel támogatott fuzzy modellek, valamint a hibrid szabályzási algoritmusok eredményesen alkalmazhatók a gumiipari gyártási folyamatok, így különösen a vulkanizálás optimalizálására [14-17].

2 ANYAG ÉS MÓDSZER

A kialakított fuzzy vezérlőrendszer három egymásra épülő fázisra tagolódik:

2.1 Fuzzyfikálás (bemenetiadat-transzformáció)

A vulkanizálási folyamatban négy kulcsfontosságú bemeneti tényezőt azonosítottunk: szerszámhőmérséklet, gőznyomás, ciklusközi szünetidő és relatív páratartalom. A tagsági függvények tervezése a következő lépéseket foglalta magába:

A ciklusközi szünetidőre háromszög alakú tagsági függvényeket definiáltunk: 0–1 perc (rövid), 0,5–2 perc (közepes), 1,5–5 perc (hosszú). A relatív páratartalom esetén trapéz alakú tagsági függvényeket alkalmaztunk: 0–10% (alacsony), 8–40% (normál), 35–100% (magas). Gauss-görbe jellegű tagsági függvényeket rendeltünk a szerszámhőmérséklet finomhangolt értékeléséhez, mivel ott a valós mérések körül kisebb ingadozások is jelentősen befolyásolják a vulkanizálás minőségét. Minden tagsági függvény 0–1 közötti értékkel fejezi ki, hogy a pillanatnyi mérés mennyire illeszkedik egy adott nyelvi kifejezéshez [2].

2.2 Szabálybázis és következtetés

A döntési logika *if-then* szerkezetekből épül fel, összesen 45 szakértői szabályt definiáltunk. Például:

IF (Páratartalom IS magas)
AND (Szerszámhőmérséklet IS közepes) (1)
THEN (Vulkanizálási idő IS növelendő)

A szabályok finomhangolását a gyártásból érkező adatok segítségével végeztük el a korábbi selejtarány és ciklusadatok elemzése alapján. A Mamdani-típusú kompozíciós következtetést alkalmaztuk, amely a szabályok előfeltételeinek illeszkedési fokát egyesíti a konklúzió fuzzy kimenetével [5]. Az ezt követő lépés a defuzzifikálás, vagyis akimeneti numerikus értékképzés. A kimeneti fuzzy halmazokat a súlyponti (Center of Gravity, COG) módszerrel alakítottuk egyetlen, folytonos numerikus vezérlőjellel:

$$yi^* = \frac{\int y \in \text{supp}(Bi^*) Bi^*(y) dy}{\int y \in \text{supp}(Bi^*) Bi^*(y) dy} \quad (2)$$

$$wi^* = \int y \in \text{supp}(Bi^*) Bi^*(y) dy \quad (3)$$

$$yCOG = \frac{\sum_{i=1}^r (yi^* \cdot wi^*)}{\sum_{i=1}^r (wi^*)} \quad (4)$$

Ez lehetővé teszi a fűtési szelep folyamatos nyitásvezérlését, elkerülve a tranziensekből adódó túllövéseket [6].

2.3 Szimuláció és validáció

A teljes fuzzy vezérlőmodellt MATLAB/Simulink környezetben implementáltam, ahol laboratóriumi adatokkal kalibráltuk a tagsági függvényeket és a szabályokat.

A szimulációs eredményeket összevetettük egy valós üzemmellel, ahol a prototípus vezérlőrendszert három hónapos próbapados tesztelés során értékeltük. A fuzzy rendszer bevezetése után a selejtarány 12%-ról 4%-ra csökkent, a ciklusidők átlagosan 5%-kal egyenletesebbek lettek, és a gőzfogyasztás 8%-kal mérséklődött.

3 EREDMÉNYEK

3.1 Membránmonitorozó rendszer teljesítménye

A vulkanizáló prések gumimembránjának állapotát figyelő fuzzy rendszer bevezetésével jelentősen javult a korai hibadetektálás pontossága és megbízhatósága. A hagyományos megoldásként alkalmazott egyszerű riasztási küszöbértékekkel szemben – melyeknél alacsony beállítás esetén sok volt a téves riasztás, magasra állítva pedig a rendszer nem jelezett időben, ami miatt jelentős selejt keletkezhetett – a fuzzy logika alkalmazása kiegyensúlyozottabb működést eredményez.

A tervezett fuzzy szabályrendszer több bemeneti változót (pl. környezeti páratartalom, hőmérsékleti adatok, membránhasználati idő) együttesen értékeli, és öt tagsági függvényre osztja a kritikus paraméter tartományát a finomabb érzékenység érdekében. Ennek köszönhetően a riasztások jóval nagyobb pontossággal jelzik előre a membrán meghibásodását – a detektálás sikeressége meghaladta a becslések szerint a 90%-ot –, miközben minimálisra csökkent a hamis riasztások száma. A későbbiekben bevezetett AI alapú prediktív rendszer működésének eredményességét a gyártási adatok is alátámasztják. Amennyiben a fuzzy alapú monitorozás időben érzékel egy gőzszivárgást vagy membránsérülést, lehetővé válik a prés azonnali leállítása és a hiba elhárítása, mielőtt a hiba további selejt termékeket okozna. Mérések szerint egy átlagos membránhiba esetén 5–6 abrancsot is meg lehet menteni ilyenkor, ugyanis ennyi selejtes termék keletkezne, mielőtt a probléma a hagyományos szemrevételezés során kiderülne. A fuzzy rendszer bevezetésével tehát a membrán okozta selejtarány drasztikusan csökkenthető, hosszú távon gyakorlatilag a nullára.

Az új membránmonitorozó megoldás nemcsak a selejtszámot mérsékli, hanem a meghibásodások előrejelzésének sikeraránya is kiemelkedő: a rendszer az esetek túlnyomó többségében képes volt még a kritikus állapot bekövetkezése előtt jelezni a beavatkozás szükségességét. Mindezt a saját fejlesztésű szabálybázis által generált folyamatos visszajelzés biztosítja, ami lehetővé teszi a membrán élettartamának dinamikus becslését a gyártási folyamat során. Az esettanulmányban egy 3D felületen szemlélteti a membrán élettartam-optimalizálás fuzzy modelljének kimenetét, melyen látható, hogy a rendszer az alacsony élettartamtartományokban már megfelelő jelzést ad, a teljes skálán való finomhangolás pedig tovább növeli a pontosságot. Összességében a membránállapot-figyelő fuzzy rendszer jóval megbízhatóbb előrejelzést és kisebb selejtaránnyal járó üzemet eredményez a korábbi, fix küszöbértékeken alapuló módszerhez képest.

3.2 "Smart Curing" rendszer eredményei

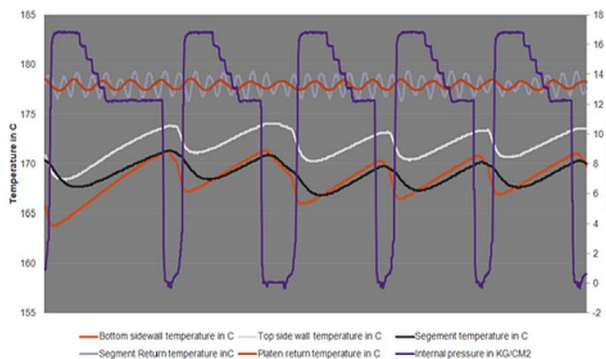
A *Smart Curing* nevű intelligens vulkanizálási rendszer esetében a fuzzy logika alkalmazása több szempontból is jelentős javulást hozott a hagyományos technológiához viszonyítva. Az új szabályozás bevezetésének egyik fő célja az energiahatékonyság növelése volt. A kísérleti eredmények alapján a kétkörös fuzzy szabályozású fűtési rendszerrel a gőzfogyasztás várhatóan 10–20%-kal csökkenthető a jelenlegi egykörös megoldáshoz képest, emellett a vulkanizálási ciklusidőben is 5–10%-os csökkenés érhető el. Ezek az értékek összhangban vannak a projekt kezdeti becsléseivel, és rámutatnak a fuzzy alapú vezérlés potenciális gazdasági és termelékenységi előnyeire. Az időmegtakarítás abból adódik, hogy az elméleti számítások szerint elegendő a szükséges

hőenergiát a termékbe juttatni a kellő mértékű térhálósodáshoz; ezt követően a folyamat külső hőbevitel nélkül is befejeződhet, így a ciklus a szükséges energia közlése után leállítható, ami lerövidíti a vulkanizálási időt anélkül, hogy a végtermék minőségét csökkentené. A ciklusidő ilyen optimalizálása a 3T-elv (*Time, Tension, Temperature*) alkalmazásával vált lehetővé, melynek keretében a vulkanizálás időtartamát, hőmérsékletét és nyomását egyszerre szabályoztuk a folyamat optimalizálására.

A másik fő eredmény a hőmérsékleteloszlás egyenletességének javulása a vulkanizáló szerszámon belül. A korábbi rendszerben – ahol a teljes formafűtés egyetlen gőzkörön történt – a különböző szerszámrészek hőmérséklete között jelentős eltérések alakultak ki. Gyakran előfordult, hogy a futófelületi rész és az oldalfali részek hőmérséklete nem volt azonos, mivel a gőz a felső fűtőlappból sorosan haladt át a formán az alsó fűtőlapp felé. Ennek következtében a szerszám belsejében hőmérséklet-inhomogenitás volt megfigyelhető, és a gumiabroncsot nem azonos intenzitású hőhatás érte, ami az broncs egyes részein eltérő mechanikai tulajdonságokat eredményezhet, szélsőséges esetben selejt termékhez vezet. Ezzel szemben az új, fuzzy vezérelt rendszerben a fűtőkört két ágra bontottuk (belső és külső kör), így a szerszám különböző részein külön szabályozható a hőmérséklet. Az új kivitelű kétkörös gőzrendszer lehetővé teszi, hogy közvetlenül mérjük a forma egyes kritikus pontjainak hőmérsékletét, ezáltal jóval több információ áll rendelkezésre a termék aktuális hőállapotáról és a beavatkozás szükségességéről. Az új szabályozási architektúrában mind a futófelületet melegítő, mind az oldalfalakat melegítő ág saját szeleppel és érzékelővel rendelkezik, így a két rész hőmérséklete egymástól függetlenül szabályozható.

A mérési eredmények igazolják a hőmérséklet-eloszlás kiegyenlítését az intelligens rendszer alkalmazásával. A jelenleg használt rendszerben a két fűtőlapp hőmérséklete folyamatosan kb. 3–4 °C-os ingadozást mutatott, és a ciklus végére a különböző szerszámrészek között akár 4–5 °C-os hőmérsékletkülönbség is kialakult.

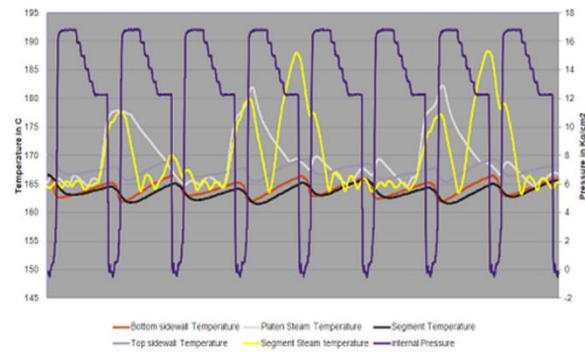
Az 1. ábra egy hagyományos vulkanizálási ciklus hőmérséklet-ingadozásait szemlélteti. Látható, hogy a ciklus során a szerszám különböző pontjain jelentős hőmérsékletkülönbségek alakulnak ki, ami instabil hőprofilhoz vezet.



1. ábra: Hagományos vulkanizálási ciklus

Ezzel szemben, a 2. ábrán látható új fuzzy szabályozás eredményeként, a forma különböző pontjain mért hőmérsékleti görbék sokkal közelebb kerültek egymáshoz:

a hőmérsékleti ingadozás mindössze 2–3 °C a ciklus során, és a futófelületi rész, valamint az alsó oldalfal hőmérséklete csaknem azonos.



2. ábra: Smart Curing-vulkanizálási ciklus

Fontos kiemelni, hogy a hőmérsékleti profil optimalizálását a rendszer proaktív módon segíti elő – például a prés nyitáskor történő átmeneti hőmérsékletnöveléssel –, így a ciklus elején kevesebb ideig kell maximális gőzzel fűteni, ami tovább csökkenti a szükséges vulkanizálási időt. Az új szabályozási megoldás számos előnnyel jár: javult a szerszám hőmérsékletének stabilitása és egyenletessége, ami kedvezően hat a késztermék minőségére. A homogénebb hőeloszlás révén az broncs különböző részeinek mechanikai jellemzői egyenletesebbé válnak, csökken az egyes zónák közti eltérés, például keménységben vagy rugalmasságban. Várható, hogy ezáltal mérséklődik a korábban az egyenlőtlen vulkanizálásból fakadó selejtképződés is, hiszen kisebb az esélye annak, hogy egy broncs valamely része alul- vagy túlvulkanizált maradjon.

Összehasonlítva a korábbi megoldásokkal, mindkét fejlesztés jelentős előrelépést mutat. A membránfigyelő fuzzy rendszer a fix határértékekkel dolgozó régi módszerhez képest sokkal adaptívabb és megbízhatóbb: képes finomabban beállítani az érzékelési küszöböt és egyszerre több tényezőt figyelembe venni, így időben jelez és minimalizálja a kiesést. Ennek eredményeként a membrán okozta váratlan állásidők és selejtek száma jelentősen csökkenthető. Hasonlóképpen, a *Smart Curing*-fuzzy szabályozás a hagyományos egykörös hőmérsékletszabályozással szemben hatékonyabb és precízebb: csökken az energiafelhasználás és a ciklusidő, miközben javul a hőmérsékleti profil, és ezáltal a termék minősége. Bár az új rendszer bonyolultabb felépítésű, és a több szabályozóelem miatt a karbantartási igénye is némileg magasabb, az elért eredmények – az egyenletesebb hőmérséklet-eloszlás, a rövidebb vulkanizálási idő és a jobb mechanikai minőség – messzemenően igazolják a fejlesztés létjogosultságát.

Az alkalmazott fuzzy logikai megközelítés tehát sikeresen hozzájárulhat a gumiipari vulkanizálási folyamat optimalizálásához mind a gyártási hatékonyság, mind a termékminőség terén.

4 EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az eredmények egyértelműen igazolják, hogy a fuzzy alapú vezérlés bevezetése jelentős pozitív hatást gyakorolt

a vulkanizálási folyamatra és a gyártás teljesítményére. A fejlesztés révén csökkent a gépállásidő, ritkultak a váratlan karbantartási beavatkozások, mérséklődött a selejt aránya, és javult a termelés hatékonysága, ami összességében a beruházás gyors megtérülését eredményezi. Az alábbiakban összefoglaljuk a legfontosabb eredményeket strukturált formában.

Gépállásidő csökkenése: Korábban egy membrán meghibásodása elkerülhetetlenül gépleálláshoz vezetett, hiszen a jelenlegi rendszer csak az első selejtes termék keletkezése után riaszt és állítja le a prést.

Ez azt jelenti, hogy minden váratlan membránsérülés legalább egy selejtabroncsot és a termelés megszakítását okozta. A fuzzy vezérlés bevezetésével lehetővé vált a membrán állapotának előrejelzése és a beavatkozás még a szakadás bekövetkezése előtt. Ennek köszönhetően a prések váratlan leállásai gyakorlatilag megszűntek, mivel a membránt még a töréspont előtt, tervezett leállás keretében lehet kicserélni. A megelőző csere minimálisra csökkenti a nem tervezett állásidőt, ezáltal növeli a berendezés rendelkezésre állását és a gyártási kapacitást.

Karbantartási beavatkozások ritkulása: A fuzzy alapú rendszer egyik fontos eleme a többszörös bemeneti paraméterek használata, beleértve a páratartalom- és a hőmérséklet-érzékelő párhuzamos alkalmazását. A meglévő páratartalom-érzékelő a használat során hajlamos elszennyeződni és egy idő után megbízhatatlanná válni, ami eddig rendszeres tisztítást vagy cserét igényelt.

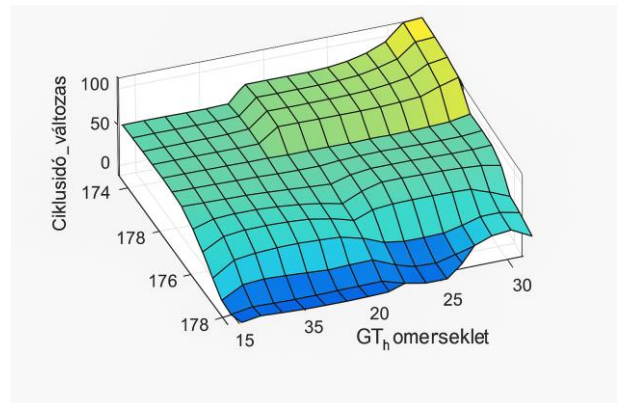
Az új fuzzy vezérlés azonban redundáns módon építi be a hőmérsékleti adatokat is a döntéshozatalba: ha a páraérzékelő meghibásodik vagy fals jelet ad, a rendszer a hőmérséklet alapján továbbra is működőképes marad és megelőzi a selejtképződést. Így a szenzor hibája vagy karbantartási igénye esetén sem kell azonnal leállítani a gépet – a tisztítás vagy csere ütemezhető egy tervezett karbantartási intervallumba. Ez a redundancia jelentősen csökkenti a karbantartás miatti váratlan beavatkozások gyakoriságát. Emellett a kétkörös gőzrendszerre való áttérés (belső és külső fűtőhurkok szétválasztása) a berendezések igénybevételét is mérsékli, mivel az adott oldal fűtését le lehet kapcsolni, például állás vagy formaátállítás esetén, így a komponensek (szelepek, membránok) kevésbé kopnak. Ennek eredményeként a tervezett karbantartások között eltelt idő nő, és a karbantartási költségek csökkennek.

Selejt csökkenése, minőségjavulás: A fuzzy vezérlés elsődleges célja a vulkanizálási ciklus során keletkező selejtabroncsok számának minimalizálása volt. A hagyományos rendszerben a membránszakadás következtében keletkező selejtet csak utólag észlelték, így minden ilyen esemény egy hibás terméket eredményezett. Az új detektáló és szabályozó mechanizmus viszont proaktívan beavatkozik: ha a bemeneti változók (páratartalom, hőmérséklet, ciklusidő-szünet hossza, membrán élettartama százalékban) olyan kombinációját érzékeli, ami a membrán kifáradására utal, akkor jelzi a szükséges beavatkozást (például a ciklus felfüggesztését vagy a membrán cseréjét) még mielőtt a hiba ténylegesen bekövetkezne. Így a membránsérülés miatti selejt termékek száma közel nullára csökkenthető, hiszen az esetleges rendellenességet azelőtt detektáljuk, hogy az abroncs károsodna. Ezen túlmenően a fuzzy algoritmus a vulkanizálási folyamat paramétereinek optimalizálásával hozzájárul a konzisztensebb minőséghez is. Például a

jelenlegi hagyományos fűtési rendszerben jelentős hőingadozások lépnek fel a ciklusok során (a szerszám hőmérséklete ingadozik), ami negatívan befolyásolja a gumitermékek minőségstabilitását. A bevezetett új, két szabályzóköörös gőzrendszer és fuzzy logika kombinációja sokkal egyenletesebb hőmérséklet-profilt biztosít: míg a jelenlegi rendszerben nagy hőmérséklet-eltérések figyelhetők meg, addig a továbbfejlesztett rendszerben a hőmérsékleti ingadozások csökkennek.

A folyamatstabilitás javulása közvetlen hatással van a minőségre: csökken a túl- vagy alulvulkanizálás esélye, ezáltal kevesebb selejt keletkezik a nem megfelelően kivulkanizált termékekből. Összességében a selejtarány redukálása nyersanyag-megtakarítást és hulladékcsökkentést eredményez, ami nemcsak gazdasági, de környezeti szempontból is előnyös.

A kétkörös fűtési rendszer és a fuzzy szabályozás lehetővé teszi a vulkanizálási folyamat finomhangolását az aktuális külső körülményekhez. Ennek köszönhetően csökkent az egy abroncsra jutó vulkanizálási idő: a becslések szerint 5–10%-kal rövidebb idő szükséges egy ciklus lefolytatásához. Ez azt jelenti, hogy adott idő alatt ennyivel több terméket lehet vulkanizálni, tehát a gyártósor kapacitása 5–10%-kal emelkedhet a fejlesztés hatására. A 3. ábra szemlélteti a bemeneti paraméterek (pl. nyersgumi hőmérséklete, szerszám átlaghőmérséklete, prés mellékideje) hatását a ciklusidő-változásra a fuzzy szabálybázis figyelembevételével.



3. ábra: Vulkanizálási ciklusidő változása a bemeneti függvények hatására

Látható, hogy a rendszer képes adaptívan növelni vagy csökkenteni a ciklusidőt a körülmények függvényében – például hosszabb gyártási megszakítás után kissé növeli a ciklushosszt a minőségbiztosítás érdekében, míg normál körülmények között gyorsítja a ciklust. Ennek a dinamikus optimalizációnak az eredménye a ciklusidő átlagos csökkenése, ami összességében a termelési volumen növekedéséhez vezet. Ráadásul a gőzfogyasztás 10–20%-os csökkenése is elérhető az új rendszerrel, mivel az energiafelhasználást a rendszert pontosabban hangolja össze a szükségletekkel. Az energiahatékonyság javulása közvetlen költségmegtakarítást jelent a gyár számára, és hozzájárul a fenntarthatóbb működéshez is.

Beruházási költség és ROI (befektetésarányos megtérülés): Az eredmények ismeretében elvégezhető a fejlesztés megtérülési idejének becslése. A fuzzy alapú vezérlés bevezetése viszonylag kis beruházási költséggel

járt a potenciális hasznokhoz képest. A főbb ráfordítások között említhető a rendszer fejlesztési és integrációs költsége (szoftverfejlesztés, vezérlő algoritmus implementálása a PLC-be vagy egyéb irányító egységbe), a szükséges érzékelők (például redundáns hőmérséklet-szenzor) és műszerezés kiépítése, valamint a kétkörös fűtési rendszer hardveres átalakítása (az új elektro-pneumatikus szelepek és csővezeték kiépítése a belső és külső kör szétválasztásához). Ezek a kezdeti költségek azonban a megtakarítások fényében gyorsan megtérülnek. A gőzfogyasztás akár 20%-os csökkentése éves szinten jelentős energiaköltség-megtakarítást hoz, és a 5–10%-kal rövidebb ciklusidő pedig növeli a termelési darabszámot, ami többletprofitot eredményez. Emellett a selejtermékek számának drasztikus csökkenése további költségmegtakarítást jelent (hiszen kevesebb anyagot és munkaidőt pazarol a gyár hibás darabokra), valamint a gépállásidő minimalizálása fokozza a termelékenységét. Becslés alapján a beruházás megtérülési ideje akár körülbelül 1 évre tehető, ami kivételesen jó arány az ipari automatizálási projektek körében. Ez azt mutatja, hogy a fuzzy logikára épülő optimalizálás üzemi környezetben nemcsak műszaki, de jövedelmezőségi szempontból is megalapozott és kifizetődő fejlesztés.

5 ÖSSZEGZÉS

A tanulmányban bemutatott megoldás rávilágított arra, hogy a fuzzy szabályozás ígéretes és hatékony eszköz a modern gumibroncsgyártás folyamataiban felmerülő problémák kezelésére. Összefoglalásképpen megállapítható, hogy a fejlesztett, fuzzy alapú vezérlőrendszer bevezetése jelentősen hozzájárult a vulkanizációs technológia optimalizálásához és a gyártás hatékonyságának javításához.

A dolgozat rámutatott a fuzzy logika gyakorlati alkalmazhatóságára egy nagy volumenű ipari folyamatban. Bemutatta, hogy a mesterséges intelligencia és a hagyományos gépipari vezérlés integrációja lehetséges és kifizetődő: a fuzzy rendszer képes természetes nyelvi szabályok formájában kezelni a tapasztalati tudást, ezáltal hidat képezve az emberi szakértelem és az automatizált vezérlés között. A fejlesztés során létrejött modell modulárisan továbbfejleszthető és más, hasonló jellegű területeken is alkalmazható, például olyan gyártósori folyamatnál, ahol több bizonytalan vagy összefüggő paraméter együttes hatását kell figyelembe venni a szabályozás során. A kutatás eredményei megerősítik, hogy a fuzzy logika nem pusztán elméleti kuriózum, hanem valós ipari innovációk alapja lehet, amely kézzelfogható, mérhető javulást hoz a termelésben.

A kutatás lezárása után számos további fejlesztési lehetőség kínálkozik a rendszer tökéletesítésére. Az egyik fontos irány a fuzzy rendszer továbbfejlesztése új bemeneti paraméterek bevonásával. Érdemes megvizsgálni, hogy további szenzorok vagy folyamatjellemzők (például a présben uralkodó nyomás dinamikája, a nyersanyag tulajdonságai, környezeti paraméterek stb.) bevétele miként javíthatná a modell előrejelző képességét. Új bemeneti változók integrálásával a szabályrendszer még pontosabban az adott gyártási környezetre szabható, ami még jobb eredményeket hozhat a selejtszűrés és ciklusidő-optimalizálás terén.

További potenciál rejlik a fuzzy rendszer önadaptívva tételében is. Jelenleg a szabálybázis és a tagsági függvények szakértői tudás és kísérleti finomhangolás

eredményeként jöttek létre. A jövőben azonban lehetséges olyan tanuló algoritmusok integrálása, amelyek a rendszer működése során gyűjtött adatok alapján automatikusan hangolják a fuzzy szabályokat vagy tagsági függvényeket.

A szakirodalomban találunk példákat genetikus algoritmusok által vezérelt fuzzy rendszertervezésre is, ahol a keresési folyamat optimalizálja a szabályrendszert. Emellett a modern irányítástechnikai platformok (pl. a Siemens TIA Portal) már tartalmazznak *autotuning* funkciókat is, amelyek iteratív paraméterállítással érik el a kívánt beállításokat. E technikák integrálása lehetővé tenné egy önhangoló, önoptimalizáló fuzzy vezérlés kialakítását, amely a változó üzemi körülményekhez folyamatosan alkalmazkodik. Így például a rendszer képes lenne valós időben tanulni az új tapasztalatokból: ha változik a gumikeverék összetétele vagy az üzemeltetési környezet, a vezérlés automatikusan igazítaná a döntési szabályokat a korábbi beavatkozások sikeressége alapján. Az önadaptív megközelítés növelné a szabályozás robusztusságát és hosszú távon is biztosítaná az optimális teljesítményt.

Végezetül kiemelendő, hogy a fuzzy logika alkalmazása a gumiipari vulkanizálásban nemcsak az adott esetben hozott számottevő javulást, hanem példaértékű lehet más ipari folyamatok számára is. A dolgozatban bemutatott eredmények azt sugallják, hogy a fuzzy alapú szabályozók bevezetése az Ipar 4.0 törekvésekkel összhangban lévő lépés, amely a hagyományos gyártórendszereket intelligensebbé, rugalmasabbá és hatékonyabbá teheti. A fejlesztés konklúziója tehát az, hogy a bizonytalanságokat és nemlinearitásokat jól kezelő fuzzy vezérlés életképes és jövőbe mutató megoldás a gyártás optimalizálás és minőségbiztosítás területén, melynek továbbfejlesztése és széles körű ipari alkalmazása a következő évek során várhatóan egyre inkább előtérbe kerül.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), pp. 338–353.
- [2] Smith, J., & Brown, L. (2018). Thermal variability in vulcanization processes. *Journal of Rubber Research*, 21(2), pp. 145–158.
- [3] Lee, C. C. (1990). Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 20(2), pp. 404–418.
- [4] Novak, V., Perfilieva, I., & Mockor, J. (2012). *Mathematical Principles of Fuzzy Logic*. Springer.
- [5] Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [6] Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), pp. 1–13.
- [7] Lee, C. C. (1996). Fuzzy logic in home appliances: Applications and benefits. *Appliance Automation Journal*, 4(1), 22–30.
- [8] Belohlavek, R., Klir, G. J. (eds.). (2011). *Concepts and Fuzzy Logic*. The MIT Press, Cambridge-Massachusetts, London-England.
- [9] Lin, C., Liu, M., & Zhu, J. (2013). Research on Fuzzy Adaptive PID Control Algorithm Based on Siemens PLCSIM.. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electric and Electronics (EEIC 2013)*.
- [10] Reznik, L., Ghanayem, O., Bourmistrov, A. (2000). PID plus fuzzy controller structures as a design base for industrial applications. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 13(4), pp. 419–430.
- [11] Anh, H. P. H., Nam, N. T. (2011). A New Approach of the Online Tuning Gain Scheduling Nonlinear PID Controller Using Neural Network. In T. Mansour (Ed.) *PID Control, Implementation and Tuning*.
- [12] Han, I.-S., Chung J. (1996). Dynamic Simulation of the Tire Curing Process. *Tire Science and Technology* 24(1) pp. 50–76.

- [13] Optimal cure steps for product quality in a tire curing process- In- Su Han, Chang-Bock Chung, Hyeong-Gwan Jeong, Sung-Ju Kang, Seung-Jai Kim, Ho-Chul Jung (First published: 22 September 1999)
- [14] Wang, X., & Xu, W. (2022). Intelligent Control of Rubber Curing Processes Using Deep Learning-enhanced Fuzzy Systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- [15] Zhao, Y., Chen, J., & He, L. (2021). A Hybrid Neuro-fuzzy System For Temperature Control in Industrial Curing. *IEEE Access*, 9, pp. 45098–45110.
- [16] Kaur, H., & Kaur, M. (2023). Optimization of Manufacturing Parameters in Tire Curing Using Artificial Intelligence-based Fuzzy Logic. *Materials Today: Proceedings*, 72, pp. 1589–1595.
- [17] Sun, J., & Ma, Y. (2023). Application of Data-driven Fuzzy Control in Intelligent Manufacturing: A Case Study in Rubber Processing. *Expert Systems with Applications*, 222, 119407.