

UNS alapú referencia architektúra ISA-88 kompatibilis elektronikus gyártásnaplóhoz kisüzemi szeszőzdek számára

A UNS Based Reference Architecture for ISA-88 Compliant Electronic Batch Records in Artisanal Distillery SMEs

ing. TAMÁS-PÉTER József¹, PÓCS Géza²

¹ Debreceni Műszaki Egyetem, Debrecen, Ótemető u. 2-4, 4028 Magyarország, +4 0770124697, tamas.peter.jozsef@eng.unideb.hu, <https://eng.unideb.hu/>

² V Atipic F, Kolozsvár, Iuliu Maniu (Szentegyház) u. 13, 400095 Románia, +4 0741457975, pocsgeza@gmail.com

Abstract

Small and medium-sized distilleries face increasing regulatory pressure for batch traceability, yet lack a cost-effective pathway to digitalize production records. Commercial Manufacturing Execution Systems (MES) are prohibitively expensive, while paper-based methods are error-prone and fail traceability requirements. Despite the availability of affordable IoT sensors and open-source middleware, no published reference architecture integrates these into a standards-compliant system for batch-process SMEs. This paper proposes a reference architecture mapping ISA-88's three complementary models onto a Unified Namespace (UNS) using open-source components (MQTT, InfluxDB, Node-RED, Grafana). The proposed architecture is implemented and evaluated on an instrumented distillery testbed, demonstrating automated electronic Batch Record (eBR) generation from sensor data, manual inputs, and laboratory results across the full production cycle.

Keywords: Industry 4.0; Unified Namespace (UNS); ISA-88; electronic Batch Record (eBR); SME digitalization;

Kivonat

A kis- és közepes méretű szeszőzdek egyre növekvő szabályozási nyomással szembesülnek a gyártási tételek nyomonkövethetősége terén, mégsem rendelkeznek költséghatékony megoldással a gyártási dokumentáció digitalizálásához. A kereskedelmi gyártásvezérlési rendszerek (MES) megfizethetetlen költségek, a papíralapú módszerek pedig hibára hajlamosak és nem felelnek meg a nyomonkövethetőségi követelményeknek. A megfizethető IoT szenzorok és nyílt forráskódú eszközök ellenére nem létezik publikált referencia architektúra, amely ezeket szabványos rendszerbe integrálja szakaszos gyártású KKV-k számára. A dolgozat egy referencia architektúrát javasol, amely az ISA-88 három egymást kiegészítő modelljét Egységesített Névtérre (UNS) képezi le nyílt forráskódú komponensekkel (MQTT, InfluxDB, Node-RED, Grafana). A javasolt architektúra megvalósítása és kiértékelése műszerezett desztillációs kísérleti környezetben történik, bemutatva az automatikus elektronikus gyártásnapló (eBR) generálását szenzor-, kézi és laboratóriumi adatokból a teljes gyártási ciklus mentén.

Kulcsszavak: Ipar 4.0; Egységesített Névtér (UNS); ISA-88; elektronikus gyártásnapló (eBR); KKV digitalizáció

1. BEVEZETÉS

Az élelmiszeripari termékek teljes tétel nyomonkövethetőségét az EU 178/2002 rendelete írja elő^[3], a szeszes italokra vonatkozó sajátos dokumentációs követelményeket pedig a 2019/787 rendelet rögzíti^[4]. A szakaszos gyártásvezérlés és dokumentáció nemzetközi szabványa az ISA-88 (IEC 61512), amely eljárási, fizikai és folyamatmodell, négy szintű recepthierarchiát (általános, telephely, mester és vezérlőrecept), valamint a gyártásnaplót, mint elsődleges dokumentációs elemet definiál^[1]. Az ISA-88 bevezetése azonban hagyományosan vállalati szintű MES vagy DCS infrastruktúrát feltételez, így a szabványnak megfelelő digitalizáció a kisebb gyártók számára elérhetetlen maradt^[6]. Az európai szeszőzdek túlnyomó többségét KKV-k alkotják, ezek gyártási dokumentációja többségben jelenleg is papíralapú^[9]. Az ISA-88 kompatibilis

kereskedelmi platformok, mint a Siemens SIMATIC Batch, Rockwell PharmaSuite vagy AVEVA Batch Management költségei meghaladják egy kisüzemi szeszfőzde éves költségkeretét^{[9][11]}. A meglévő kézműves szeszfőzde menedzsment eszközök egyike sem működik azon a folyamatszabályozási szinten, amelyre az ISA-88 vonatkozik. Ez dokumentációs hiányt okoz, amelyre nincs KKV által megfizethető megoldás.

Az Egységesített Névtér (UNS) MQTT^[2] üzenetközvetítővel és ISA-95 (IEC 62264) kompatibilis témahierarchiával^[7] megvalósítva, nyílt forráskódú komponensekre építve (Mosquito, InfluxDB, Node-RED, Grafana, a MING szoftvercsomag) kis erőforrásigényű IIoT integrációs architektúra, amely KKV költségvetéshez illeszkedik^{[11][13]}. A szakirodalomban UNS megvalósításokat diszkrét gyártás monitorozására közöltek (a legfrissebb UNS teljesítményvizsgálat is OPC-UA-t és MQTT-t hasonlít össze, szakaszos eljárássemantika nélkül^[5]), valamint OEE követésre (Overall Equipment Effectiveness) ^[10], az ISA-88 kutatások viszont OPC-UA és PLC infrastruktúrát céloznak^{[6][8]}. Az ISA-88 állapotartó eljárás hierarchiájának leképezése állapotmentes, eseményvezérelt UNS-re elektronikus gyártásnapló (eBR) generálásához, feltáratlan: publikált munka nem foglalkozik vele. Az ISA-88 állapotartó eljárásmodelljének és az MQTT eseményvezérelt topológiájának összeegyeztetése a dolgozat fő műszaki kihívása, amelyet a 3.3 fejezet tárgyal.

Az architektúra négy megközelítéssel hidalja át az ISA-88 és a UNS működési elvei közti különbséget, amelyeket a 3.3 fejezet ismertet. Az inkrementális, rendszerzavartűrő gyártásnapló összeállítás kizárólag nyílt forráskódú szoftverrel valósul meg. Az architektúrán túl a dolgozat teljes hárommodelles ISA-88 leképezést ad UNS témahierarchiával, amely heterogén kézműves szakaszos gyártáshoz igazodik, és nyílt forráskódú validálással igazolja a magas eljáráslefedettséget KKV számára elérhető eszközökkel, a vállalati MES platformok töredékéért. Mivel az EU 178/2002 és 2019/787 rendeleteit általánosan elérhető hardveren elégíti ki, az architektúra az első szabvány-kompatibilis, elérhető árú digitalizációs utat kínál azoknak az európai kézműves szeszfőzdek túlnyomó többségének, amelyek ma még papíron dolgoznak. Egyúttal más szakaszos ágazatokra is adaptálható keretet kínál.

2. HÁTTÉR

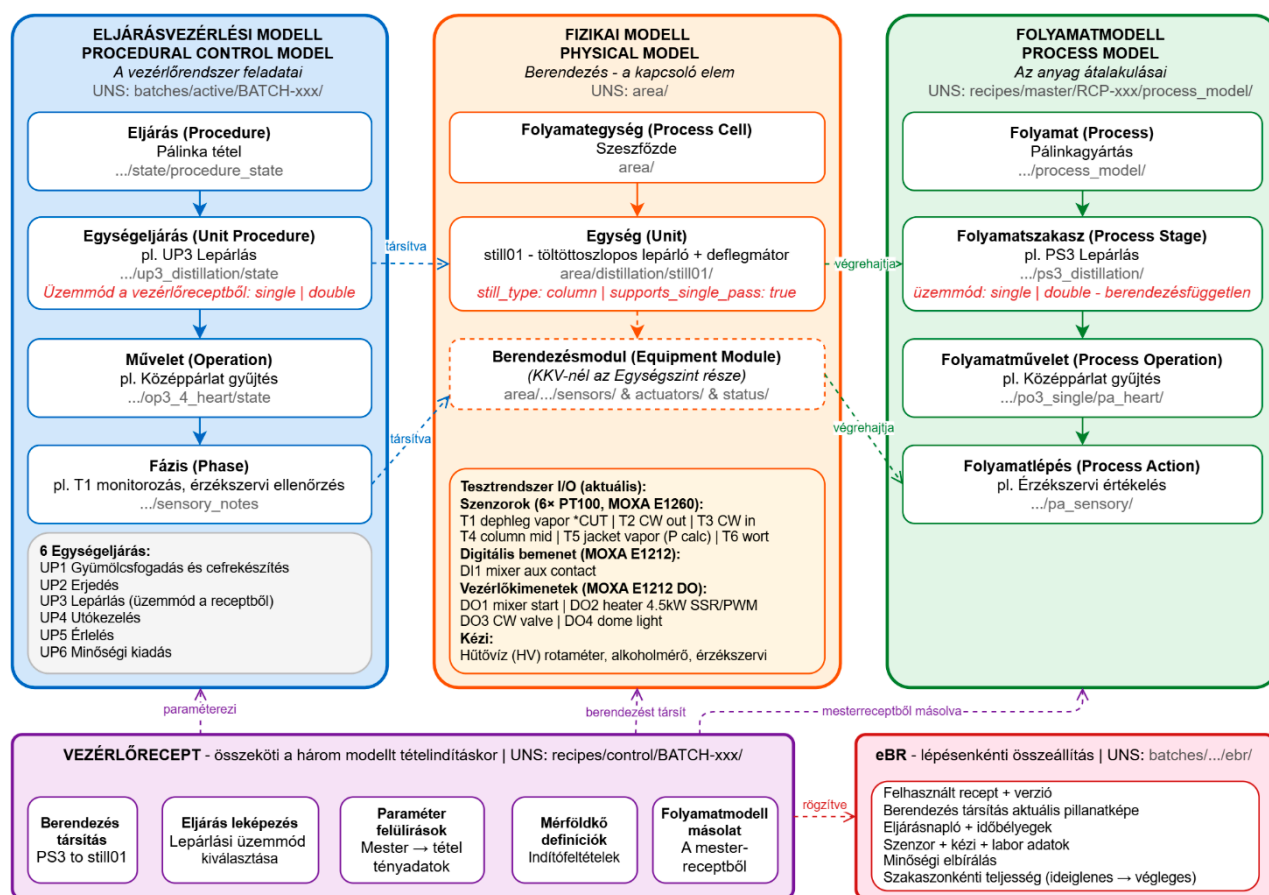
Az ISA-88 három egymást kiegészítő modellt definiál: fizikai berendezéshierarchiát, eljárási végrehajtás állapotgépet, valamint eszközfüggetlen anyagátalakítási folyamatmodellt. Ezeket négy szintű recepthierarchia köti össze: általános, telephely, mester és vezérlőrecept^[1]. A mesterrecept a folyamatmodellt verziózott sablonként tartalmazza. Gyártástétel indulásakor a vezérlőrecept ezt konkrét berendezésekhez köti az adott tételre nézve. Ez a hármas kapcsolat, eljáráslemek, berendezések és folyamatfunkciók között, az ISA-88 magja, amelyet az 1. ábra részletez.

A UNS megközelítésben minden üzemi adat egyetlen hierarchikus névtérbe érkezik, egy MQTT üzenetközvetítőbe ISA-95 kompatibilis témahierarchiával^[7]. Az üzenetközvetítő (MQTT broker) valós időben közvetíti az eseményeket, míg az idősor adatbázis (InfluxDB) a perzisztens tárolást biztosítja. A Node-RED-dal és a Grafanával együtt ezek alkotják a MING szoftvercsomagot ^[13]. Masood és Sonntag ^[9] az anyagi és tudásbeli korlátokat azonosították a KKV-k Ipar 4.0 adaptációjának fő akadályaként. Sem a UNS, sem az ISA-88 szakirodalom nem foglalkozik a szakaszos gyártás eljárássemantikájával, ezt a hiányt azonosítottuk.

3. FOLYAMATMODELL ÉS ARCHITEKTÚRA

3.1 ISA-88 hárommodelles leképezés a pálinkagyártásra

A folyamatmodell a pálinkagyártást hat folyamatszakszakra bontja (cefrekészítés, erjedés, lepárlás, utókezelés, érlelés, minőségi kiadás). Mindegyik folyamatműveletet és folyamatlépéseket tartalmaz, amelyeket a mesterrecept eszközfüggetlen sablonként rögzít. Az eljárásmodellben e szakaszok hat egységeljárásra (UP1–UP6) képeződnek le a gyümölcsfogadástól a lepárláson át a minőségi kiadásig. Az egységeljárások közötti heterogenitás, a teljesen szenzoros vezérlésűtől (UP3 Lepárlás) a teljesen manuálisig (UP1 Gyümölcsfogadás), a kézműves gyártásra jellemző, és közvetlenül meghatározza az architektúra adatfűzés igényeit. Az adatgyűjtés tervezése szempontjából ez az eltérés meghatározó. A tesztrendszer töltöttoszlopos lepárlót alkalmaz egyszeri lepárlással. Az architektúra üstös, kétszeri lepárlást is támogat receptszintű konfigurálással, a névtérstruktúra módosítása nélkül. A fizikai modell a UNS berendezés névtérére képeződik le. Kisüzemi szeszfőzde esetén a berendezésmódul és vezérlőmódul szintek az egység szint részének vannak tekintve (pl. still01), mivel a kézműves berendezések nem moduláris felépítésűek. Az eljárási állapotgép az elsődleges útvonalat valósítja meg (Idle → Running → Complete), Hold és Abort átmenetekkel. A köztes ISA-88 állapotok kihagyhatók, mert operátorütemű kézi folyamatoknál szükségtelenek. Az ISA-88 hárommodelles leképezést a pálinkagyártásra az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. Az ISA-88 hárommodelles architektúra UNS névterekre leképezve a pálinkagyártáshoz

3.2 Architektúra és UNS témahierarchia leképezés

A névtér három megvalósított ágra tagolódik: a berendezés névtér (area/) az ISA-95 hierarchiát követi szenzor, beavatkozó és állapottémákkal. A 'batches/' alatti tételkezelési névtér az eljárás hierarchiát, adatokat, anyagokat és az eBR összeállítási státuszát tartalmazza tételenként. A recept névtér (recipes/) pedig a mester és tételenkénti vezérlőrecepteket tárolja. Három további ág (riasztások, személyzet, infrastruktúra) fejlesztés alatt áll.

Az architektúra a gyártásdokumentálást folyamatszabályozással egyesíti, amelynek részleteit a 3.4 fejezet tárgyalja. A frakciószedési döntések ugyanakkor operátorfüggőek maradnak, mivel azok érzékszervi értékelést igényelnek. A rendszerarchitektúrát, testrendszer kialakítást és a UNS témahierarchiáját a 2. ábra mutatja.

3.3 Architektúra sablonok állapottartó tételkezeléshez állapotmentes UNS-en

A fő műszaki feladat az ISA-88 feltételezéseinek összegegyeztetése az MQTT üzenetközvetítő állapotmentes, lapos, eseményvezérelt topológiájával. Az ISA-88 ugyanis tartós állapotot, hierarchikus végrehajtást, receptvezérelt paraméterezést és heterogén időbeli adatokat feltételez, míg az MQTT-alapú architektúrák eredendően állapotmentesek és eseményvezérelt topológiájúak.

Ez a fejezet négy, általánosan alkalmazható architektúra sablont mutat be. Az elsődleges sablon, a dolgozat fő hozzájárulása, a perzisztens kontextusú állapotkezelés:

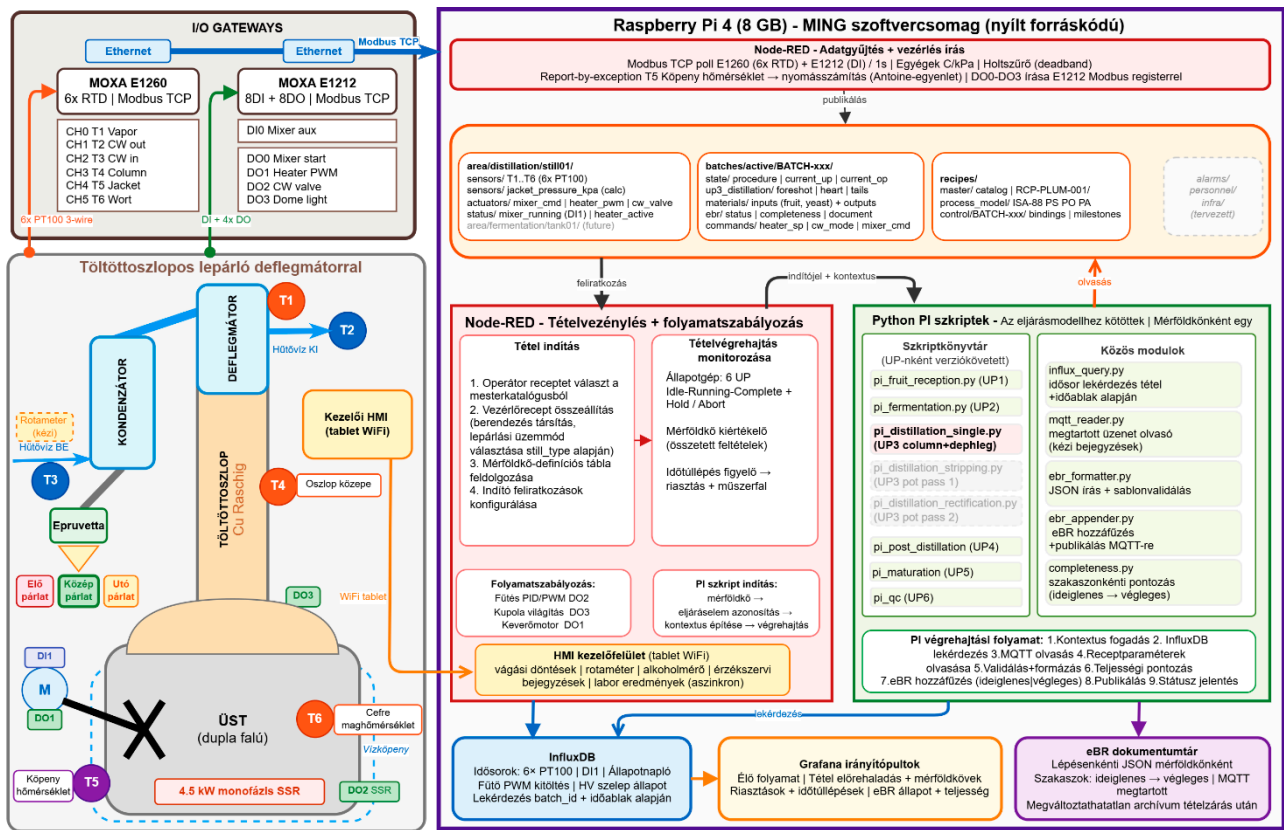
Állapottartó eljárások állapotmentes üzenetközvetítésben. A Node-RED perzisztens kontextustárja kezeli a tétel állapotgépet; az állapotátmeneteket bejövő MQTT üzenetek váltják ki (pl. amikor T1 túllépi az előpárlat leválasztási küszöbértéket). A megtartott üzenetek biztosítják, hogy a tétel közben csatlakozó feliratkozó is megkapja az aktuális állapotot.

Három másodlagos sablon egészíti ki az architektúrát.

Eljárás hierarchia vs. témahierarchia mélység. Az ISA-88 négy eljárás szintje túlzott mélység nélkül képezhető le MQTT témákra. A fizikai modell az area/ ágat foglalja el; az eljárás állapot a batches/ alatt tételazonosító és egységeljárás szerint kódolt, öt-hat szintre korlátozva a mélységet, a teljes hierarchia az üzenetek tartalmában megmarad és hatékony wildcard feliratkozásra ad módot.

Receptkezelés dedikált motor nélkül. A mesterreceptek megtartott üzenetként publikálódnak a UNS-be és tartalmazzák az ISA-88 folyamatmodell hierarchiát. Tételindításkor a Node-RED vezérlőreceptet indít a mesterrecept másolásával: berendezésekhez köti a folyamatszakaszokat, érvényesíti az operátori felülírásokat, és a vezérlőrecept téma alatt publikálja.

Heterogén időbeli adatok és hiányos bejegyzések. Szenzorjeleket 5 másodpercenként kapunk, laboratóriumi eredményeket órákkal később, operátori bejegyzéseket szabálytalanul. A report-by-exception adatgyűjtéssel nagyban csökken az adatárolási és adatfeldolgozási költség. Minden üzenet batch_id-t és UTC időbélyeget hordoz és az eBR szakaszok ideiglenes, végleges vagy hiányos jelölést kapnak. Tételzáráskor a Node-RED a vezérlőrecept ellenőrzőlistájához mérten értékeli a teljességet, így utólagos módosítás és karanténjelölés is lehetséges marad.



2. ábra. A teszrendszer fizikai architektúrája, a UNS témahierarchiája és az adatáramlás

3.4 Vezénylés és az elektronikus gyártásnapló összeállítása

A Node-RED egyszerre lát el vezénylési és folyamatszabályozási feladatokat. Tételindításkor a vezérlőrecept mérföldkötáblázatából konfigurálja az indító feliratkozásokat: egyszerű küszöbátlépések és összetett feltételek egyaránt támogatottak. Folyamatszabályozási oldalon a fűtés PID/PWM hurkot a T6-on (cefre maghőmérséklet) a D01-en vezérli, a hűtővíz-logikát a D02-n, a keverő-szekvenciát a D00-n DI0 visszajelzéssel. A D03 a kupola megvilágítást kapcsolja.

Minden eljárási mérföldkőnél a Node-RED egy dedikált Python folyamatutasítás-szkriptet (PI szkript) indít, amely az eljáráslelemhez van rendelve, nem a recepthez. Minden PI szkript az eljárásvezérlési modellhez kötődik: a pi_distillation_single.py szenzorleolvasásokat, frakciószedési időbélyegeket és operátori megjegyzéseket gyűjt terméktípustól függetlenül. A recept csupán paramétereket szolgáltat. Receptek között ezek a szkriptek újrafelhasználhatók, folyamatlépésenként verzióztak. A végrehajtás első lépésben kontextust fogad a Node-RED-től, majd lekérdezi az adott időablak szenzoradatait az InfluxDB-ből. Ezt követően kiolvassa a kézi bejegyzéseket a megtartott MQTT üzenetkből, elvégzi a validálást az elvárt séma szerint, és kiszámítja a szakasz hiánytalansági mutatóját. Végül az adatokat hozzáfűzi az eBR JSON dokumentumhoz, és a frissített eBR-t megtartott üzenetként publikálja.

Az eBR a tétel előrehaladtával inkrementálisan épül: minden mérföldkő egy adatsomag hozzáfűzést vált ki, ami összeomlástűrést biztosít. Tartalmaz **adminisztratív mezőket** (tételfejléc, minőségi elbírálás), **folyamatadatokat** (eljáráslemlapló időbélyegekkel, szenzor összefoglalók, kézi bejegyzések) és

anyagnyilvántartást (anyag be-/kimenet, laboratóriumi eredmények, szakaszonkénti hiánytalansági mutatók). Záráskor az eBR megváltoztathatatlan dokumentumként archiválódik.

4. MEGVALÓSÍTÁS ÉS TESZTELÉS

Három teljes gyártási ciklust hajtottunk végre két egymást követő napon a lejáró tesztrendszeren (2. ábra). Közegként vizet választottunk egyszeri lejárési módban, hogy az architektúra validálását eljárási állapotkezelés, eBR összeállítás, hibakezelés szempontból elvégezhesük. Az UP1-et és az UP6-ot manuálisan töltöttük fel a kezelői felületen (HMI) keresztül a strukturált adatrögzítés ellenőrzésére; az UP3 automatikus folyamatszabályozással futott. A fennmaradó szakaszokban az UP2, UP4 és UP5 manuális bejegyzésekként került rögzítésre. A 3. tételben szándékosan T1 szenzorkimaradást idéztünk elő (~90 másodperc a frakciószedés alatt) a rendszer hibatűrésének tesztelésére szenzorhiba esetén.

ISA-88 lefedettség kategóriánként 3 gyártási ciklus alapján

1. táblázat

Kategória	Elemek száma	Lefedett elemek	Lefedettség	Adatforrások
Eljáráshierarchia	20	18	90%	Szenzor, kézi, rendszer
Receptkezelés	5	5	100%	Rendszer
Anyagkövetés	8	6	75%	Kézi
Állapot, vezérlés és minőség	10	10	100%	Szenzor, rendszer
Kivételkezelés	5	3	60%	Rendszer
Összesen	48	42	87.5%	

Az ISA-88 alapján azonosított 48 eljáráslemből 42 teljes lefedettséget ért el (87,5%), 6 esetében kézi bevitel szükséges. Az anyagkövetés részleges eredményt mutat, mert a vizes tesztfuttatásoknál valós átvételi és alkoholmérési adat nem állt rendelkezésre. Az architektúra a strukturált mezőket helyesen rögzítette, de a tartalmat szimuláltuk. Minden futtatás teljesen összeállított, inkrementálisan épített eBR JSON dokumentumot eredményezett átlagosan 140 KB méretben, amely megfelel a nyomonkövethetőségi követelményeknek. A 3. tételben bekövetkezett T1 kiesés aktiválta a karanténlogikát, amely a frakciószedési szakaszt hiányosnak jelölte 78%-os hiánytalansági mutatóval, ezzel igazolta a hibatűró működést szenzormeghibásodás esetén.

A felhasznált eszközök: Raspberry Pi 4 8 GB: 604 lej+áfa; MOXA ioLogik E1260: 1885 lej+áfa; MOXA ioLogik E1212: 1105 lej+áfa; hat Guenther PT100 RTD szonda: 6 × 118 lej+áfa; kiegészítő elemek: kontaktor, 24 V tápegység, félvezető relé, kábelezés. Ezek összértéke 4800 lej+áfa alatt marad, szoftverlicenc költség nélkül. Ez a kereskedelmi ISA-88 kompatibilis MES platformokéhoz képest több, mint két nagyságrendnyi költségcsökkenés ^{[6][9]}.

5. KÖVETKEZTETÉS

A tesztrendszeren elvégzett validálás megerősítette, hogy az ISA-88 eljárási, fizikai és folyamatmodellje Egységesített Névter témahierarchiára leképezhető. A három vizes közegű ciklusban elért csaknem teljes eljáráslefedettség azt is igazolja, hogy kizárólag nyílt forráskódú komponensekkel is megvalósítható az eBR generálása. Az architektúra az ISA-88 állapotartó eljárásmodellje és a UNS eseményvezérelt topológiája közötti eltérést Node-RED vezénnyel, megtartott MQTT üzenetekkel az állapotperzisztencia biztosítására, Python PI szkriptekkel az inkrementális eBR összeállításához és report-by-exception szenzorkezeléssel oldja fel.

Korábbi publikáció sem mutatta be, hogy kézműves szeszfőzdek szabványnak megfelelő, nyílt forráskódú úton juthatnak ISA-88 kompatibilis elektronikus gyártásnaplóhoz gazdaságos hardverköltésen, miközben az EU nyomonkövethetőségi előírásait maradéktalanul teljesítik.

A jelenlegi validálás fő korlátja, hogy közegként vizet használtunk, ami eltér az alkohol desztillációtól. Ezért a következő lépés egy kereskedelmi KKV szeszfőzde partnernél történő üzembe helyezés, ezt követően pedig eltérő műszerezettségű telephelyeken végzett validálás a minimális szenzorkonfiguráció meghatá-

rozásához. Hosszabb távon az eBR adatfolyamra építve teljes anyagkövetést, ISA-95 szintű vállalatintegrációt és MI alapú anomáliafelismerést tervezünk. Ezt az irányt párhuzamos munkánkban vizsgáljuk, ahol MCP alapú digitális ikerrendszert építünk gyártási MI ügynökök számára^[12].

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] ANSI/ISA. *ISA-88.00.01-2010, Batch Control Part 1: Models and Terminology*. International Society of Automation, Research Triangle Park, NC, 2010.
- [2] Banks, A., Briggs, E., Borgendale, K., Gupta, R. (eds.). *MQTT Version 5.0*. OASIS Standard, 2019. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html> (Utolsó letöltés: 2026. 02. 15).
- [3] European Parliament. *Regulation (EC) No 178/2002 laying down the general principles and requirements of food law*. Official Journal of the European Communities, 2002, L 31, 1–24.
- [4] European Parliament. *Regulation (EU) 2019/787 on the definition, description, presentation and labelling of spirit drinks*. Official Journal of the European Union, 2019, L 130, 1–63.
- [5] Freitas, L., Silva, M., Vale, G., Avram, C., Lopes, H., Pereira, F., Leal, N., Machado, J. *OPC UA and MQTT performance analysis within a unified namespace context*. Internet of Things. Elsevier, 2025, 33, 101734. doi: 10.1016/j.iot.2025.101734
- [6] Garcia, A., Oregui, X., Arrieta, U., Valverde, I. *Methodology and Tools to Integrate Industry 4.0 CPS into Process Design and Management: ISA-88 Use Case*. Information. MDPI, 2022, 13(5), 226.
- [7] IEC. *IEC 62264-1:2013, Enterprise-control system integration – Part 1: Models and terminology*. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2013.
- [8] Kaczmarczyk, V., Benešl, T., Bradáč, Z., Fiedler, P., Kaczmarczyková, Z. *SkuBATCH – System for control of technological processes*. IFAC-PapersOnLine. Elsevier, 2019, 52(27), 477–483.
- [9] Masood, T., Sonntag, P. *Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs*. Computers in Industry. Elsevier, 2020, 121, 103261.
- [10] Mastang, Pahmi, M. A. *Development of Raspberry Pi applied to real-time monitoring of Overall Equipment Effectiveness (OEE)*. J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publishing, 2020, 1477, 052013. doi: 10.1088/1742-6596/1477/5/052013
- [11] Szedmák, Gy., Kun, Sz. *Erjesztés nyomon követése online diagnosztikai eszközök (IoT) segítségével*. In: Takács, L. (szerk.) *Quintessence – 2024: A pálinka világa*, Ongai Kulturális Egyesület, Onga, 2024, 212–234.
- [12] Tamás-Péter, J., Pócs, G. *MCP-alapú Digitális Ikrek Fejlesztési Keretrendszere Gyártási MI Ügynökök Számára*. Dunakavics Tudományos Hétvége, 2025.
- [13] Tamás-Péter, J., Tamás-Péter, T. *Az Automatizálástól a Digitalizációig és a Mesterséges Intelligenciáig: Az Ipar 3.0, 4.0 és 5.0 Összehasonlító Elemzése*. OGÉT-2025, XXXIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, EMT, 2025.