

Z. Perić, M. Ferhatović, I. Filipašić, L. Kocijan, I. Čičak*

UPRAVLJANJE OPREMOM POD TLAKOM – PREGLED ZAKONODAVNOG OKVIRA, METODA ISPITIVANJA I SUVREMENIH TRENDOVA

UDK 621.5, 331.45:621.5
PRIMLJENO: 16.3.2026.
PRIHVAĆENO: 3.4.2026.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License



SAŽETAK: U ovom članku analizira se kompleksan sustav upravljanja opremom pod tlakom kroz sve faze njezina životnog ciklusa, od inicijalnog projektiranja i proizvodnje do eksploatacije i konačnog povlačenja iz uporabe. Oprema pod tlakom, zbog akumulirane energije koju sadrži, predstavlja visokorizičnu skupinu tehničkih sustava, što zahtijeva strogo poštivanje zakonodavnog okvira, prvenstveno Europske direktive PED 2014/68/EU¹. Poseban fokus stavljen je na suvremene metode ispitivanja bez razaranja (NDT²), kao što su radiografija i ultrazvuk, koje omogućuju detekciju unutarnjih defekata bez narušavanja integriteta opreme. Članak također istražuje utjecaj ljudskog faktora i analizira stvarne industrijske nesreće (poput BLEVE³ eksplozija) kako bi se ukazalo na važnost sigurnosnih sustava. Zaključno, rad pruža uvid u budućnost upravljanja kroz digitalizaciju i koncept "Digitalnih blizanaca", koji omogućuju proaktivno djelovanje i minimizaciju rizika u modernim industrijskim postrojenjima.

Cljučne riječi: oprema pod tlakom, PED direktiva, NDT ispitivanja, korozija, sigurnost na radu, digitalni blizanci

UVOD

Upravljanje opremom pod tlakom predstavlja jedan od najsloženijih i najodgovornijih segmenata suvremenog strojarstva i procesne industrije. Pod pojmom opreme pod tlakom podrazumijevamo širok spektar tehničkih sustava, od malih spremnika zraka i cjevovoda, pa sve do masivnih parnih kotlova i reaktora u kemijskoj industriji. Ono što je zajedničko svim tim sustavima je akumulirana unutarnja energija koja, u slučaju bilo kakvog strukturnog popuštanja, može dovesti do trenut-

nog i razornog oslobađanja snage s katastrofalnim posljedicama za ljude, imovinu i okoliš. (ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)).

Povijest industrijskog napretka neraskidivo je vezana uz razvoj parnih strojeva, ali i uz tragične nesreće koje su pratile njihov rani razvoj. Upravo su te nesreće bile katalizator za uvođenje prvih rigoroznih tehničkih normi. Danas, u 21. stoljeću, upravljanje ovim sustavima više nije prepušteno intuiciji, već je strogo regulirano Direktivom o opremi pod tlakom (PED 2014/68/EU) i pratećim harmoniziranim normama koje definiraju životni ciklus opreme od samog nacрта pa sve do tre-

*Zlatko Perić, mr. sig., Pročelnik odjela sigurnosti Veleučilišta u Rijeci, (zperic@veleri.hr), (autor za dopisivanje), Veleučilište u Rijeci, 51000 Rijeka, Hrvatska, Mensur Ferhatović, mr. sig., JVP Grada Rijeke, (mensur.ferhatovic@vatrogasci-rijeka.hr), Grad Rijeka, 51000 Rijeka, Hrvatska, Ida Filipašić, student, (ifilipasi@veleri.hr), Leona Kocijan, student, (lkocijan@veleri.hr), Igor Čičak, student, (icicak@veleri.hr), Veleučilište u Rijeci, 51000 Rijeka, Hrvatska.

¹The Pressure Equipment Directive (PED) (2014/68/EU) applies to the design, manufacture and conformity assessment of stationary pressure equipment

²Nondestructive testing ili Non-destructive testing

³Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

nutka njezina povlačenja iz uporabe. (Direktiva 2014/68/EU).

ZAKONODAVNI OKVIR I NORMATIVNA REGULATIVA

Upravljanje opremom pod tlakom temelji se na principu sigurnosti tijekom cijelog vijeka trajanja. Zakonodavstvo se dijeli na dva dijela: pravila za stavljanje nove opreme na tržište (proizvođači) i pravila za uporabu te opreme (korisnici).

Direktiva o opremi pod tlakom (Pressure Equipment Directive - PED) najvažniji je dokument u EU. Navedena direktiva propisuje da sva oprema s tlakom većim od 0,5 bara mora zadovoljiti bitne sigurnosne zahtjeve. Pojam opreme pod tlakom odnosi se na posude, cjevovode, sigurnosni pribor i tlačni pribor, uključujući, prema potrebi, elemente koji su pripojeni dijelovima pod tlakom kao što su prirubnice, spojnice i nosive uške (1). Proizvođač mora osigurati da je oprema sigurna, što uključuje pravilan odabir materijala, proračun čvrstoće, kontrolu proizvodnje i ispitivanje gotovog proizvoda

Propisi ne tretiraju jednako mali spremnik zraka i veliki kotao poput onog u termoelektrani. Oprema se razvrstava u četiri kategorije (I do IV), a kategorija ovisi o trima faktorima:

- Vrsti opreme: posuda, kotao ili cjevovod;
- Sadržaju (mediju): grupa 1 - opasni mediji (eksplozivni, otrovni, zapaljivi), grupa 2 - svi ostali mediji (voda, para, zrak);
- Veličini i tlaku: umnožak tlaka i volumena za posude, ili tlaka i promjera za cjevovode.

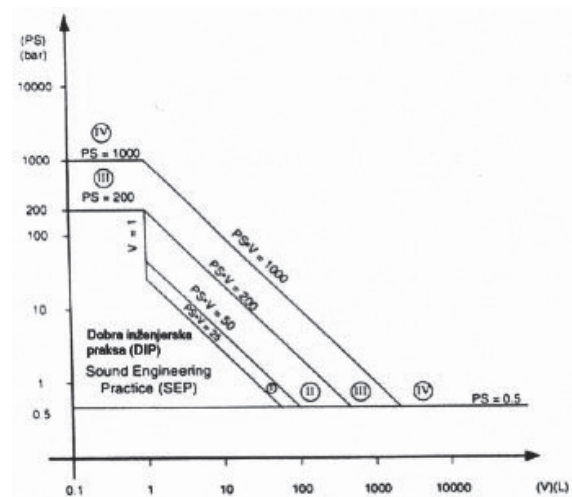
Ovisno o kategoriji, propisano je koliko "stroga" mora biti provjera od strane nadležnog tijela. Prema tome, za kategoriju I proizvođač sam kontrolira proizvodnju (unutarnja kontrola) prema Pravilniku o tlačnoj opremi, Pravilniku o pregledima i ispitivanju opreme pod tlakom visoke razine opasnosti i Direktivi 2014/68/EU.

- Kategorije II, III i IV: Zahtijevaju uključivanje vanjske institucije koja provjerava nacрте, nadzire ispitivanje tlakom i izdaje certifikate.

Nakon što se oprema ugradi, na snagu stupaju nacionalni propisi (u Hrvatskoj: Pravilnik o pregledima i ispitivanju opreme pod tlakom).

Ovi propisi definiraju:

- Registracija opreme: Svaka posuda dobiva svoj evidencijski broj pri nadležnom tijelu.
- Klasifikacija prema razini opasnosti: Oprema se dijeli na onu visoke i niske razine opasnosti, što diktira učestalost inspekcija.
- Obveze vlasnika: Vlasnik mora voditi "Knjigu opreme" u koju se upisuju svi servisi i pregledi.



Dijagram 1. Ocjena sukladnosti posuda
Diagram 1. Evaluation of the conformity of dishes

PROJEKTIRANJE I PRORAČUN ČVRSTOĆE

Projektiranje opreme pod tlakom nije samo crtanje oblika, već rigorozan proces dokazivanja da će materijal izdržati ekstremna naprezanja tijekom 10, 20 ili više godina rada.

- Prije početka bilo kakvog proračuna, inženjer mora definirati:
- Projektni tlak (P): Maksimalni tlak koji se može pojaviti u normalnom radu (uvijek je veći od radnog tlaka).
- Projektna temperatura (T): Temperatura na kojoj se određuju mehanička svojstva materijala (čelik gubi čvrstoću na visokim temperaturama).

- Dodatak za koroziju (c): Predviđeni gubitak debljine materijala tijekom vijeka trajanja (obično 1–3 mm).
- Faktor zavarenog spoja (z): Broj koji pokazuje koliko je povjerenje u kvalitetu zavara (npr. 1.0 ako se zavar 100 % snima RT-om, ili 0.85 ako se snima samo djelomično).

Oprema pod tlakom nikada nije samo cijev; ona ima otvore, priključke i podnice.

Vrste podnica (poklopaca): Najsigurnije su sferne ili elipsoidne podnice jer najbolje raspoređuju naprezanje. Ravne podnice zahtijevaju puno veću debljinu materijala.

Ojačanja otvora: Svaki put kad se izbuši rupa u posudi za ventil ili cijev, struktura slabi. Oko otvora se moraju zavariti prsteni za ojačanje.

Za kompleksnu opremu (poput velikih izmjenjivača topline ili nuklearnih reaktora), jednostavne formule nisu dovoljne. Tada se koristi Metoda konačnih elemenata (Finite Element Analysis FEA). To je računalna simulacija koja bojama (plava za nisko, crvena za visoko naprezanje) prikazuje točno gdje bi posuda mogla popustiti. (*HRN EN 13445, ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)*).

Materijal mora biti "žilav", a ne "krt". Najčešće se koriste:

- Ugljični čelici (npr. P235GH): Za standardne temperature i neagresivne medije.
- Austenitni nehrđajući čelici (npr. 316L): Za kemijsku industriju i visoku koroziju.
- Legirani čelici: Za ekstremno visoke temperature (preko 500°C) u elektranama.

Proračun prema EN 13445-3 (Europska norma)

Prema EN 13445-3 (2021./2022.), proračun za cilindrične omotače pod unutarnjim tlakom (Clause 7) temelji se na nazivnom naprezanju.

Formula za minimalnu potrebnu debljinu:

$$e = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot f \cdot z \cdot P}$$

e: potrebna debljina stijenke (analizna debljina).

D_i: unutarnji promjer posude.

f: dopušteno proračunsko naprezanje za materijal (prema EN 13445 tablicama).

z: faktor učinkovitosti zavara (slično kao ASME-ov faktor E)

Proizvodnja, zavarivanje i ispitivanje

Proces proizvodnje opreme pod tlakom podliježe najstrožim kontrolama u strojarstvu. Svaka faza mora biti dokumentirana i sljediva. Prije rezanja prvog lima, vrši se provjera certifikata.

Atuiranje (Sljedivost): Svaki komad lima ili cijevi mora imati utisnut broj šarže koji se podudara s certifikatom proizvođača. Ako se lim reže, oznaka se mora "prenijeti" na svaki odrezani dio uz prisustvo kontrolora.

Oblikovanje: Valjanje plaštava i izrada podnica (hladnim ili toplim postupkom). Ovdje je važno paziti da ne dođe do prevelikog stanjivanja materijala na zakrivljenim dijelovima.

Zavarivanje je srce proizvodnje. Budući da je zavar "najslabija točka" posude, on mora biti izveden savršeno.

WPS (Welding Procedure Specification): Dokument koji točno propisuje struju, napon, brzinu zavarivanja, vrstu plina i dodatnog materijala.

Atesti zavarivača: Svaki zavarivač mora imati važeći certifikat za točno određeni postupak i poziciju zavarivanja.

Postupci:

- TIG (141): Za korijene zavara i precizne spojeve.
- REL (111): Ručno elektrolučno, za montažne radove.
- EPP (121): Automatsko zavarivanje pod praškom (koristi se za duge uzdužne i kružne šavove na velikim posudama jer daje najvišu kvalitetu).

Nakon što se posuda zavari, u materijalu ostaju ogromna unutrašnja naprezanja.

Žarenje: Cijela posuda (ili samo zavari) se zagrijava na temperaturu od cca 550-650°C i polako hladi. To "opušta" metal i sprječava njegovo pucaње tijekom rada pod tlakom. (*HRN EN 13445*,

HRN EN 13480, ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC).

NDT ispitivanja (Non-Destructive Testing) ili nerazorne metode kontrole kvalitete obuhvaćaju niz tehnika za provjeru strukturnog integriteta materijala, zavara i komponenti bez oštećivanja njihove funkcionalnosti. Koriste se za otkrivanje površinskih i volumetrijskih grešaka. Ključne NDT metode:

- Vizualna kontrola (VT): Pregled golim okom ili pomagalicama.
- Ispitivanje penetrantima (PT): Otkrivanje površinskih pukotina pomoću penetrirajućih tekućina.
- Magnetska kontrola (MT): Detekcija površinskih i podpovršinskih grešaka u feromagnetskim materijalima.
- Ultrazvučna kontrola (UT): Volumetrijsko ispitivanje unutrašnjosti materijala pomoću visokofrekventnih valova.
- Radiografska kontrola (RT): Snimanje rendgenskim ili gama zrakama za uvid u unutarnju strukturu.
- Vrtložne struje (ET): Elektromagnetska metoda za provjeru vodljivih materijala.

Primjena NDT-a:

- Kontrola zavara: Ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva u proizvodnji i na montaži.

- Energetika i procesna industrija: Pregled tlačnih posuda, cjevovoda i postrojenja (rafinerije, elektrane itd.); (*Prakash, 2019.*).

Puštanje u rad i završna kontrola

Ovo je najvažniji test integriteta. Posuda se puni vodom (voda je nestišljiva, pa je u slučaju puknuća test siguran; zrak bi uzrokovao eksploziju). Tlak se podiže na ispitni tlak (Pt), koji je obično 1,25 x ili 1,43 x veći od radnog tlaka. Ako posuda izdrži određeno vrijeme bez curenja i deformacija, test je uspio. (*HRN EN 13445, ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC).*)

Upravljanje integritetom opreme u radu

Upravljanje se provodi kroz strogo definirane vremenske cikluse. U RH i EU, ovi su pregledi zakonska obveza:

- Godišnji vanjski pregled: Vizualni pregled opreme dok je pod tlakom. Provjeravaju se propuštanja, stanje izolacije i rad mjernih instrumenata.
- Unutarnji pregled (svakih 5 godina): Oprema se prazni, čisti i otvara. Inspektori ulaze u posudu (ili koriste endoskope) kako bi provjerili pojavu korozije ili erozije na unutrašnjim stijenkama.
- Ispitivanje tlakom (svakih 10 godina): Ponovna provjera čvrstoće hidrauličkim testom.

Tablica 1. Shematski prikaz RBI matrice rizika

Table 1. Schematic representation of the RBI risk matrix

PoF \ CoF	A (Nizak)	B	C	D	E (Visok)
5 (Vrlo vjerojatno)	Srednji	Visok	Visok	Ekstremni	Ekstremni
4 (Vjerojatno)	Srednji	Srednji	Visok	Visok	Ekstremni
3 (Moguće)	Nizak	Srednji	Srednji	Visok	Visok
2 (Malo vjerojatno)	Nizak	Nizak	Srednji	Srednji	Visok
1 (Vrlo rijetko)	Nizak	Nizak	Nizak	Srednji	Srednji

Moderne tvornice više ne koriste samo fiksne vremenske intervale, već uvode RBI metodu.

- Što je RBI? To je proces planiranja inspekcija na temelju rizika.
- Matrica rizika: Rizik se računa kao umnožak Vjerojatnosti otkaza (koliko je oprema stara, koliko je medij korozivan) i Posljedica otkaza (opasnost za ljude, ekonomska šteta).
- Cilj: Fokusrirati resurse i češće pregledavati kritičnu opremu, dok se manje opasna oprema pregledava rjeđe.

Upravljanje znači predviđanje kvara prije nego se dogodi. Najveći neprijatelji su:

- Opća korozija: Ravnomjerno stanjivanje metala. Prati se redovitim ultrazvučnim mjerenjem debljine stijenke na fiksnim točkama.
- Lokalna korozija (Pitting): Male rupice koje mogu "probušiti" posudu iako je ostatak stijenke debeo.
- Puknuće zbog zamora materijala: Događa se kod opreme s čestim promjenama tlaka (npr. kompresorski spremnici).

Ovaj oblik korozije očituje se kao ravnomjerno stanjivanje stijenke posude na cijeloj površini koja je u dodiru s fluidom. Iako je vizualno uočljiva, ona je najlakša za upravljanje jer je njezina brzina izražena u milimetrima po godini (mm/god) uglavnom konstantna.

Metoda praćenja: Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke (UT-Ultrasonic testing) na unaprijed definiranim mjernim mjestima (tzv. TML - Thickness Monitoring Locations).

Kriterij otkaza: Kada debljina stijenke padne ispod minimalne izračunate debljine (S_{min}) uvećane za sigurnosni faktor, oprema se mora povući iz rada.

Pitting je lokalizirani oblik korozije koji stvara male, duboke šupljine. Izuzetno je opasna jer

može probiti stijenku vrlo brzo, dok ostatak posude izgleda potpuno novo.

Mehanizam: Nastaje uslijed lokalnog pucanja zaštitnog (pasivnog) sloja metala, najčešće zbog prisutnosti klorida.

Problem u upravljanju: Klasično ultrazvučno mjerenje često promaši ove sitne rupice, stoga je potreban detaljan vizualni pregled unutrašnjosti i penetrantska ispitivanja.

SCC metoda⁴

SCC predstavlja kombinaciju vlačnih naprezanja (unutarnji tlak) i korozivnog djelovanja okoliša. Ovaj mehanizam dovodi do pojave krhkih pukotina koje se šire kroz materijal.

Kritične točke: Zone utjecaja topline (ZUT) oko zavora, gdje su zaostala naprezanja najveća.

Prevenција: Pravilna toplinska obrada nakon zavarivanja (PWHT- Post Weld Heat Treatment) i kontrola kemijskog sastava fluida (npr. uklanjanje kisika ili klorida).

Erozija je mehaničko trošenje materijala uzrokovano velikom brzinom strujanja fluida ili prisutnošću krutih čestica (pijesak, kamenac). Kavitacija se javlja kod tekućina kada lokalni tlak padne ispod tlaka isparavanja, stvarajući mjehuriće koji "eksplodiraju" na stijenki i stvaraju oštećenja.

Kritična mjesta: Ulazni priključci, koljena cjevovoda i lopatice pumpi.

Zamor materijala nije kemijski već mehanički proces. Nastaje kod opreme koja radi u ciklusima (npr. autoklavi koji se stalno pune i prazne). Stalna promjena naprezanja dovodi do inicijacije mikro pukotina koje s vremenom rastu do kritične veličine prema Pravilniku o pregledima i ispitivanju opreme pod tlakom visoke razine opasnosti, HRN EN 13445, HRN EN 13480 i ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC).

⁴Stress Corrosion Cracking – (napetostna korozija)

VRSTA PREGLEDA	Radni parametri	Veličina	Prostor 1	Prostor 2	Prostor 3
<input type="checkbox"/> Prvi	Najveći dozvoljeni tlak (PS)	bar	12,0		
<input checked="" type="checkbox"/> Vanjski	Min./Max. dozvoljena temperatura (TS)	°C	-10/+50		
<input type="checkbox"/> Unutarnji	Volumen ili nazivni promjer	m ³ ili DN	3,0		
<input type="checkbox"/> Ispitivanje tlakom	Snaga ili ogrjevna površina	kW ili m ²	-		
<input type="checkbox"/> Izvanredni	Ispitni tlak	bar	17,16		
<input type="checkbox"/> Pregled prije posavog stavljanja u uporabu	Radni medij		zrak		
	Ispitni medij				

PRVI PREGLED	ZADOVOLJAVA	UNUTARNJI PREGLED	ZADOVOLJAVA
Certifikat i izvjava o sukladnosti:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Oprema ugrađena sukladno projektu:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
Tehnička dokumentacija opreme:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Stanje izolacije / AKZ:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
Dokumentacija tehnološke cjeline:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Sigurnosna oprema:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
VANJSKI PREGLED	ZADOVOLJAVA	UNUTARNJI PREGLED	ZADOVOLJAVA
Stanje vanjske površine opreme:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Stanje unutarnje površine opreme:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
Mehaničko stanje konstrukcije:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Mehaničko stanje konstrukcije:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
Korozija / Erozija:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Korozija / Erozija:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
Stanje AKZ-a:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Debljina stjenke plašta / podnice:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
Sigurnosna oprema:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Stanje AKZ-a:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
Mjerna oprema:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Ostalo:	<input type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE
Regulacijska oprema:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE	Napomena:	
Ostala oprema:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE		
Ostalo:	<input checked="" type="checkbox"/> DA <input type="checkbox"/> NE		

Slika 1. Očevidnik pregleda opreme pod tlakom

Figure 1. Pressure equipment inspection log

Sigurnosni sustavi i instrumentacija

Ventil sigurnosti je mehanički uređaj koji ne smije ovisiti o struji ili računalu.

- Postavljeni tlak (Pset): Tlak na kojem se ventil otvara. On mora biti postavljen na vrijednost nižu ili jednaku najvećem dopuštenom tlaku (Ps) posude.
- Kapacitet ispuštanja: Ventil mora biti dovoljno velik da ispusti sav fluid brže nego što tlak može rasti.
- Za razliku od ventila, disk je "osigurač" koji puca. Koristi se kod medija koji bi mogli blokirati rad ventila (npr. ljepljivi mediji) ili gdje je potreban trenutačni ispust velike količine fluida.

Kod vrlo opasnih postrojenja uvode se električni sustavi (senzori i kontroleri) koji automatski gase sustav ako tlak poraste iznad dopuštene granice. (*ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)*).

Eksplozija spremnika (BLEVE efekt u Rafineriji Feyzin)⁵

Nesreća se dogodila tijekom rutinske operacije ispuštanja vode iz spremnika ukapljenog naftnog plina (LPG Liquefied Petroleum Gas).

- Uzrok: Operater je pokušao ispustiti nakupljenu vodu s dna spremnika. Zbog zale-

⁵https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche_detaillee/1_en/?lang=en

đivanja ventila (uslijed pada tlaka i temperature), ventil se zaglavio u otvorenom položaju.

- Širenje: Nastao je ogroman oblak plina koji se zapalio. Vatra je izravno zahvatila gornji dio susjednog spremnika koji je bio pod tlakom.
- Otkazivanje opreme: Iako je spremnik imao ventile sigurnosti, oni su bili projektirani za unutarnji tlak, a ne za ekstremnu toplinu izvana koja je oslabila čelik. Čelik je izgubio čvrstoću, a tekućina unutra je počela naglo ključati.
- Ishod: Spremnik je eksplodirao (BLEVE-Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), odbacujući dijelove čelika teške nekoliko tona kilometrima daleko.
- Ljudski faktor: Nedostatak adekvatne obuke za rad u izvanrednim situacijama (zaleđivanje ventila).
- Projektni propust: Nedostatak sustava za daljinsko zatvaranje ventila u slučaju opasnosti.
- Pasivna zaštita: Spremnici nisu bili izolirani vatrootpornim materijalom koji bi kupio vrijeme vatrogascima.

ZAKLJUČAK

Upravljanje opremom pod tlakom nije statičan proces ograničen samo na trenutak proizvodnje, već dinamična disciplina koja zahtijeva kontinuiranu suradnju projektanata, proizvođača, inspekcijских tijela i krajnjih korisnika tijekom cijelog životnog vijeka opreme.

Kroz sustavnu analizu, utvrđeno je nekoliko ključnih stupova sigurnosti:

- Sustavni zakonodavni okvir: Stroga primjena PED direktive i nacionalnih pravilnika ne smije se promatrati kao administrativna prepreka industriji. Naprotiv, to je nužan sigurnosni okvir koji jamči zaštitu ljudskih života, okoliša i imovine, sprječavajući katastrofalne događaje kakve smo vidali u povijesti industrijskog razvoja.
- Integritet u fazi dizajna: Pravilno projektiranje, precizan proračun čvrstoće te be-

skompromisan izbor materijala temelji su na kojima počiva integritet svake posude. Svaki propust u ovoj ranoj fazi neizbježno dovodi do skraćenja radnog vijeka ili otkazivanja opreme pod opterećenjem.

- Proaktivno održavanje: Moderne metode poput RBI (Risk-Based Inspection) i suvremenih NDT metoda (poput ultrazvučnog Phased Array-a) omogućuju transformaciju održavanja. Ono postaje pametnije, predvidljivije i ekonomski isplativije, jer se resursi usmjeravaju tamo gdje je rizik najveći, čime se izbjegavaju neplanirani zastoji.
- Pogled u budućnost otkriva nam eru Industrije 4.0, gdje upravljanje opremom pod tlakom prelazi u digitalnu sferu. Koncept "Digitalnih blizanaca" (Digital Twins) – virtualnih replika stvarne opreme – uz podršku IoT senzora, omogućuje praćenje stanja u stvarnom vremenu. Takvi sustavi mogu predvidjeti inicijaciju pukotine ili brzinu korozije prije nego što ona postane kritična, čime se rizik od akcidenata poput BLEVE eksplozija svodi na teoretski minimum (Tao et al., 2018.)

Konačno, zaključuje se da je sigurnost opreme pod tlakom izravna funkcija kulture sigurnosti unutar organizacije. Samo dosljedna primjena tehničkih normi, redovita edukacija kadrova i precizno vođenje dokumentacije mogu osigurati da ovi snažni energetske sustavi ostanu pouzdan oslonac moderne civilizacije.

LITERATURA

Antolić, A.: *Sustav osiguravanja kvalitete pri zavarivanju opreme pod tlakom*, Sveučilište u Za-

grebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC). Sekcija VIII: Pravila za konstrukciju posuda pod tlakom (međunarodno priznati standard).

Europski parlament i Vijeće. Direktiva 2014/68/EU o usklađivanju zakonodavstava država članica o stavljanju na raspolaganje na tržištu opreme pod tlakom (PED).

HRN EN 13445. Nespaljivane posude pod tlakom – Serija normi za projektiranje, proizvodnju i ispitivanje.

HRN EN 13480. Metalni industrijski cjevovodi – Tehnički zahtjevi i proračuni.

Introduction to the basic structure of the pressure vessel. 2019. Dostupno na: <https://www.secmachinery.com/introduction-to-the-basic-structure-of-pressure-vessel.html#welding-between-parts-of-pressure-vessel>, Pristupljeno: 1.3.2026.

Ministarstvo gospodarstva. Pravilnik o pregledima i ispitivanju opreme pod tlakom visoke razine opasnosti, Narodne novine (N.N. br., 27/17.).

Prakash, R.: *Non destructive Testing Techniques*, New Age Science Limited, Kent, 2009.

Pravilnik o tlačnoj opremi (N.N., br. 79/16.).

Švaić, S. Monografija „Oprema pod tlakom“, *Sigurnost*, 49, 2007., 3, 219-242.

Tao, F., Cheng, Y., Zhang, L., Li, B., & Nee, A. Y. C.: Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018., 3563-3576

PRESSURE EQUIPMENT MANAGEMENT – OVERVIEW OF THE LEGISLATIVE FRAMEWORK, TESTING METHODS AND MODERN TRENDS

SUMMARY: This article examines the complex management system of pressure equipment throughout all phases of its life cycle, from initial design and manufacturing to operation and final decommissioning. Due to the stored energy it contains, pressure equipment is classified as a high-risk category of technical systems and requires strict adherence to the legislative framework, primarily the European Directive PED 2014/68/EU. Emphasis is placed on modern non-destructive testing (NDT) methods, such as radiography and ultrasound, which enable the detection of internal defects without compromising the equipment's integrity. The article also considers the impact of human factors and reviews real industrial accidents (such as BLEVE explosions) to underline the importance of safety systems. In conclusion, the paper offers insights into future management approaches through digitalisation and the concept of "Digital Twins", which facilitate proactive actions and risk reduction in modern industrial plants.

Keywords: *pressure equipment, PED directive, NDT testing, corrosion, occupational safety, digital twins*

*Professional paper
Received: 2026-03-16
Accepted: 2026-04-03*