

## SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA .....	7
1. BEZPIECZEŃSTWO PROCESOWE.....	11
1.1. Bezpieczeństwo procesowe drogą do nowoczesności .....	11
1.2. Bezpieczeństwo procesowe integralną częścią inżynierii procesowej .....	14
1.3. Paradygmaty bezpieczeństwa procesowego .....	17
1.4. Literatura do rozdziału 1 .....	19
2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PRZEMYSŁU PROCESOWEGO.....	20
2.1. Specyfika przemysłu procesowego .....	20
2.2. Przegląd zagrożeń procesowych .....	28
2.2.1. Podstawowe pojęcia .....	28
2.2.2. Źródła zagrożeń procesowych .....	36
2.2.3. Klasyfikacja zagrożeń procesowych .....	41
2.3. Filozofia zapewnienia bezpieczeństwa w instalacjach procesowych .....	49
2.4. Literatura do rozdziału 2 .....	54
3. STRUKTURA I CHARAKTERYSTYKA WARSTW ZABEZPIECZEŃ .....	57
3.1. Pojęcie barier i funkcji bezpieczeństwa .....	57
3.2. Klasyfikacja barier bezpieczeństwa .....	58
3.3. Charakterystyka działania warstw zabezpieczeń.....	62
3.3.1. Podstawowe miary niezawodności .....	63
3.3.2. Struktura niezawodnościowa .....	69
3.4. Źródła danych dotyczących częstości awarii i prawdopodobieństwa błędów ludzkich .....	80
3.5. Efektywność działania systemów ochronnych i przeciwdziałających .....	86
3.6. Wskaźniki ilościowe charakteryzujące bariery bezpieczeństwa .....	88
3.6.1. Cechy warstw zabezpieczeń .....	88
3.6.2. Ocena sprawności działania NWZ .....	92
3.6.3. Warstwy zabezpieczeń w przemyśle procesowym .....	94
3.6.3.1. Warstwa zapobiegania .....	94
3.6.3.2. Warstwa ochrony .....	116
3.6.3.3. Warstwa przeciwdziałania .....	118
3.6.3.4. Wpływ warstw zabezpieczeń na poziom ryzyka procesowego..	119
3.7. Literatura do rozdziału 3 .....	122

---

4. ZARZĄDZANIE RYZYKIEM PROCESOWYM W PRZEMYŚLE .....	125
4.1. Proaktywne zarządzanie ryzykiem.....	125
4.2. Pojęcie ryzyka.....	127
4.3. Źródła i receptory ryzyka .....	140
4.4. Miary ryzyka procesowego .....	144
4.4.1. Ilościowe wskaźniki ryzyka procesowego .....	144
4.4.2. Półilościowe wskaźniki ryzyka.....	152
4.4.3. Kryteria akceptacji ryzyka .....	163
4.4.4. Analiza kosztów i korzyści w obszarze ryzyka.....	170
4.4.5. Decyzje dotyczące dopuszczalności ryzyka oparte o analizę koszt- zysk .....	172
4.5. System zarządzania ryzykiem procesowym .....	174
4.5.1. Ogólny model systemu zarządzania ryzykiem procesowym .....	174
4.5.2. Przegląd metod analizy zagrożeń i ryzyka .....	180
4.5.3. Wybrane metody identyfikacji zagrożeń – HAZID .....	182
4.5.4. Lista reprezentatywnych zdarzeń awaryjnych RZA .....	188
4.5.5. Wpływ zabezpieczeń na wybór scenariuszy RZA .....	192
4.5.6. Scenariusze awaryjne dla zdarzeń RZA.....	196
4.5.6.1. Metoda drzewa błędu .....	200
4.5.6.2. Metoda drzewa zdarzeń.....	214
4.5.6.3. Model „bow-tie” .....	221
4.5.6.4. Typowe zdarzenia awaryjne występujące w przemyśle procesowym .....	222
4.5.7. Obliczanie możliwości wystąpienia zdarzeń RZA ( <i>frequency analysis</i> )...229	
4.5.8. Obliczenie wielkości skutków uwolnień substancji chemicznych .....	234
4.5.9. Obliczanie wskaźników ryzyka.....	246
4.5.10. Jakość analizy zagrożeń i oceny ryzyka procesowego.....	247
4.6. Zarządzanie ryzykiem w procesach decyzyjnych dotyczących ZDR .....	253
4.6.1. Strategie zarządzania ryzykiem .....	254
4.6.2. Obliczanie efektów domino .....	257
4.6.3. Zastosowanie analizy stref zagrożeń do planowania przestrzennego....269	
4.6.4. Zapewnienie bezpieczeństwa w transporcie substancji niebezpiecznych .....	274
4.6.5. Bezpieczeństwo transportu rurociągowego substancji niebezpiecznych poza terenem zakładu.....	276
4.7. Literatura do rozdziału 4 .....	288

---

5. ZARZĄDZANIE BEZPIECZEŃSTWEM PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH.....	294
5.1. System zarządzania bezpieczeństwem procesowym.....	294
5.2. Kultura bezpieczeństwa .....	300
5.2.1. Historyczny rozwój poziomu bezpieczeństwa.....	301
5.2.2. Warunki tworzenia kultury bezpieczeństwa .....	302
5.2.3. Wskaźniki oceny kultury bezpieczeństwa .....	307
5.2.4. Sygnały niedostrzegania zagadnień kultury bezpieczeństwa.....	309
5.3. Pomiar i ocena sprawności systemu zarządzania bezpieczeństwem .....	311
5.4. Zarządzanie w sytuacjach awaryjnych i zagadnienie ochrony obiektów przemysłowych.....	315
5.4.1. Granice sytuacji awaryjnej .....	315
5.4.2. System zarządzania awaryjnego .....	317
5.4.3. Środki techniczne wykorzystywane w sytuacjach awaryjnych .....	320
5.5. Zagadnienia bezpieczeństwa i ochrony obiektów procesowych ( <i>safety and security</i> ).....	326
5.6. Literatura do rozdziału 5 .....	332
6. METODY ANALIZ ZAGROŻEŃ I RYZYKA WYKORZYSTYWANE W AWZ .....	335
6.1. Scenariusz awaryjny .....	335
6.2. Dane wynikające z analizy zagrożeń procesowych (AZP) na potrzeby AWZ .....	339
6.3. Ogólny model obliczeniowy stosowany w AWZ .....	344
6.4. Przykłady .....	346
6.5. Literatura .....	355
7. ANALIZA WARSTW ZABEZPIECZEŃ, AWZ .....	356
7.1. Proces wykonania analizy AWZ.....	356
7.1.1. Identyfikacja reprezentatywnych zdarzeń awaryjnych RZA.....	356
7.1.2. Metody wyznaczania wielkości skutków oraz kryteria oceny wskaźnika ryzyka .....	359
7.1.3. Opracowanie scenariusza awaryjnego RSA .....	363
7.1.3.1. Identyfikacja zdarzenia inicjującego, czynników warunkujących i umożliwiających.....	363
7.1.3.2. Częstość występowania zdarzeń inicjujących, warunkujących i umożliwiających .....	368
7.1.4. Identyfikacja pierwszej pary: zdarzenie inicjujące – skutki .....	374
7.1.5. Identyfikacja NWZ i charakterystycznych wartości PFD .....	374
7.1.6. Określenie częstości występowania scenariusza RSA.....	379
7.1.7. Proces decyzyjny w zakresie dopuszczalności ryzyka dla RSA .....	381

---

7.2. System ekspercki do identyfikacji zdarzeń RZA – ExSysAWZ .....	382
7.3. Zastosowanie AWZ dla innych celów .....	384
7.4. Zastosowanie AWZ do oceny ryzyka wybuchowego na stanowisku pracy .....	385
7.5. Zalety i wady AWZ.....	394
7.6. Programy komputerowe .....	397
7.6.1. Program AWZ.....	397
7.6.2. Program ExSysAWZ.....	400
7.6.3. Program ExAWZ .....	401
7.7. Przykłady analizy AWZ .....	402
7.7.1. Przykład 1 – Analiza AWZ dla przykładu 6.4.1.....	402
7.7.2. Przykład 2 – analiza ryzyka dla magazynowania izobutanu.....	404
7.7.3. Przykład 3. Ocena zapewnienia bezpieczeństwa dla kolumny destylacyjnej .....	412
7.7.4. Przykład 4 – Analiza zagrożeń procesowych dla instalacji procesowej	419
7.7.5. Przykład 5 – Ocena ryzyka wybuchowego ATEX .....	440
7.8. Literatura .....	447
8. KSZTAŁCENIE I SZKOLENIE W BEZPIECZEŃSTWIE PROCESOWYM .....	450
8.1. Wprowadzenie .....	450
8.2. Kształcenie w zakresie bezpieczeństwa procesowego.....	451
8.3. Szkolenie .....	454
8.4. Symulatory procesowe i programy komputerowe.....	456
8.5. Szkolenie wirtualnych sytuacji awaryjnych.....	458
8.6. Zarządzanie wiedzą .....	459
8.7. Rola specjalistów bezpieczeństwa procesowego.....	461
8.8. Źródła wiedzy z dziedziny bezpieczeństwa procesowego .....	463
8.9. Literatura .....	466
SKRÓTY I SYMBOLE .....	468
SYMBOLE .....	470
POSŁOWIE.....	472
Król i Księżniczka.....	473
NOTKA BIOGRAFICZNA.....	478
SPIS ILUSTRACJI.....	480
SPIS TABEL.....	486

# PRZEDMOWA

Dyrektywa Unii Europejskiej Seveso III została wprowadzona w 2015 r. do polskiego prawa poprzez Ustawę Prawo Ochrony Środowiska. Dotyczy zapobiegania poważnym awariom w przemyśle i stawia wymagania przeprowadzenia oceny zapewnienia bezpieczeństwa dla pracowników i środowiska, poprzez wykonanie analizy zagrożeń i ocenę ryzyka. W tym zakresie, intensywnie rozwijająca się w ostatnich 30 latach nauka o bezpieczeństwie procesowym, wypracowała liczne metody analityczne i narzędzia wspomagające, które w zależności od potencjału zagrożeń mogą z powodzeniem wypełnić to zadanie.

Zakres tych zagadnień jest ogromny, a dostępna wiedza w tym zakresie w Polsce, choć istnieje, ale jest rozproszona, a także śmiał twierdzić, że jest niewystarczająca. Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej już ponad 20 lat temu wprowadził zagadnienia bezpieczeństwa procesowego w proces kształcenia studentów oraz podjął program badań naukowych. Szczególną naszą troską było rozwinięcie Studiów Podyplomowych „Bezpieczeństwo Procesów Przemysłowych” prowadzonych przez Katedrę Inżynierii Bezpieczeństwa Pracy.

Celem niniejszej książki jest przybliżenie procesu oceny zapewnienia bezpieczeństwa w procesach produkcyjnych z udziałem substancji chemicznych i pomoc inżynierom prowadzącym zakłady chemiczne w uzyskiwaniu ich celów w zakresie bezpieczeństwa i ochrony środowiska, które jednoznacznie stanowią podstawę zapobiegania stratom. Zadanie to jest rozwiązywane poprzez ustalanie relacji między występującymi zagrożeniami a stosowanymi warstwami zabezpieczeń. Relacje w ujęciu tej książki, reprezentuje poziom ryzyka procesowego. Te trzy zagadnienia, tj. zagrożenia-zabezpieczenia-ryzyko (Z-Z-R) stanowią treść tej książki. Ustaleniem szczegółowym tej relacji zajmuje się proces zarządzania ryzykiem, a szczególne miejsce zajmuje metoda analityczna zwana Analizą Warstw Zabezpieczeń (AWZ), która stanowi podstawową metodę analizy i oceny ryzyka procesowego prezentowaną w tej książce.

Książka jest poświęcona wielkotonażowym procesom przemysłowym, w których występują substancje chemiczne oraz następują chemiczne i fizyczne procesy ich przetwarzania w użyteczne produkty. Bezpieczeństwo tych procesów wymaga:

- 1 – ograniczenia do minimum awarii technicznych urządzeń przemysłowych tworzących instalacje przemysłowe, wówczas mówimy o tzw. bezpieczeństwie technicznym,
- 2 – zapobiegania i przeciwdziałania czynnikom zagrożeń decydujących o przebiegu procesu, co nazywamy bezpieczeństwem procesowym,

---

3 – unikania ekspozycji ludzi i środowiska na oddziaływanie czynników zagrożeń, wynikających z właściwości substancji chemicznych, wówczas będziemy mówić o bezpieczeństwie chemicznym.

A więc, pod tytułem tej książki „Bezpieczeństwo procesów przemysłowych” zawiera się zintegrowane podejście obejmujące wszystkie te trzy obszary bezpieczeństwa. Nie mniej jednak, z uwagi na złożoność i obszerność tych zagadnień, nasza uwaga będzie zwrócona przede wszystkim na bezpieczeństwo procesowe.

Niniejsza książka zawiera osiem głównych rozdziałów. Po wprowadzeniu w rozdziale 1 rozdział 2 dokonuje przeglądu zagrożeń procesowych, które mogą wystąpić w instalacjach procesowych wskutek uwolnienia substancji chemicznych. Zagadnienie to może pomóc w określaniu rodzaju i wielkości skutków, niezbędnych do oceny ryzyka. W rozdziale 3 scharakteryzowano system warstw zabezpieczeń stosowany w przemyśle procesowym i chemicznym. Podano rodzaje warstw zabezpieczeń oraz miary określające ich niezawodność i efektywność działania.

Rozdział 4 dotyczy zarządzania ryzykiem, a szczególnie omawia metody i narzędzia analiz zagrożeń i ryzyka oraz zwraca uwagę na scenariusze awaryjne, ich strukturę oraz metody ich identyfikacji jako podstawowy element służący do wykonania analizy AWZ. Omówiono również inne zastosowania zarządzania ryzykiem w procesach decyzyjnych dotyczących zakładów dużego ryzyka (ZDR), np. zagadnienie bezpiecznych odległości, efekty domino oraz ocenę ryzyka w transporcie drogowym i rurociągowym.

W rozdziale 5 wprowadzono omówienie podstawowych zagadnień związanych z systemem zarządzania bezpieczeństwem, a szczególnie z kulturą bezpieczeństwa w dużej mierze odpowiedzialną za kształtowanie poziomu bezpieczeństwa oraz marki firmy. Dla uwypuklenia ważności zagadnień zarządzania w sytuacjach awaryjnych podano środki techniczne służące do tego celu, a także przedstawiono aktualne zagadnienia bezpieczeństwa i ochrony obiektów procesowych. Rozdziały 6 i 7 omawiają szczegółowo analizę warstw zabezpieczeń AWZ. Podano metody analiz zagrożeń i ryzyka wykorzystywane w metodzie AWZ oraz przedstawiono kluczowy zbiór informacji i danych, gdzie określono specyfikę metody AWZ, jej strukturę i sposób wykonania wraz z niezbędnymi danymi ilościowymi. Pozwala to na określenie (obliczenie) częstości występowania scenariusza awaryjnego RZA oraz potencjalnych wielkości skutków w postaci skategoryzowanych kategorii, a to z kolei daje możliwość oceny ryzyka dla konkretnego scenariusza awaryjnego, a następnie globalną ocenę ryzyka dla całej instalacji. W dalszej części tego rozdziału pokazano zastosowanie analizy AWZ w innych zadaniach zarządzania ryzykiem, wraz z podaniem zalet i wad tej metody. Rozdział 7 również demonstruje kilka przykładów studialnych procesu zastosowania zarządzania ryzykiem do oceny zapewnienia bezpieczeństwa procesowego. Ponadto, inne przykłady obliczeniowe są zawarte we wszystkich wyżej wymienionych rozdziałach.

W rozdziale 8 omówiono zagadnienia kształcenia i szkolenia, wskazując na nowe, perspektywiczne metody, które mogą istotnie wspomagać te ważne czynniki stanowiące niezbędny element systemu zarządzania bezpieczeństwem.

Niniejsza książka nie ma charakteru monografii naukowej, gdzie zwykle przedstawiamy prawa i teorie naukowe poparte dowodami badawczymi. W zakresie zarządzania bezpieczeństwem

---

i ryzykiem liczą się przede wszystkim zagadnienia praktyczne związane z wykorzystaniem metod analiz zagrożeń i oceny ryzyka procesowego. Dlatego też, pisząc tę książkę starałem się wybrać, zalecić i zilustrować przykładami takie metody, które mają duże potwierdzenie doświadczalno-teoretyczne oraz można je możliwie szybko zastosować w praktyce bezpieczeństwa procesowego zakładów dużego ryzyka oraz wykorzystać w procesie kształcenia i szkolenia. W ostatnim czasie ukazało się wznowienie monografii „*Lee’s Loss Prevention in Proces Industries, Hazard Identification, Assessment and Control*” wydanej przez Profesora Sam Mannan z Texas A&M University, która szeroko i wyczerpująco rozwija wszystkie zagadnienia bezpieczeństwa procesowego i może być źródłem wielu informacji i wiedzy na ten temat.

Główną przyczyną opracowania tej książki była potrzeba uzupełnienia i aktualizacji polskiej literatury technicznej z przeznaczeniem dla Studentów Studiów Podyplomowych „Bezpieczeństwo Procesów Przemysłowych” oraz Studentów Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pracy w Politechnice Łódzkiej. Wydaje się, że książka ta będzie przydatna również dla Studentów Szkoły Głównej Służby Pożarnej w Warszawie oraz innych uczelni technicznych. Zawartość książki w dużej mierze odzwierciedla potrzeby programowe tych Studiów, a jej treść została wzbogacona przez inżynierów zatrudnionych w przemyśle, będących słuchaczami naszych Studiów Podyplomowych. To ich wiedza i doświadczenie, znacznie upraktyczniło książkę pisaną przez nauczyciela akademickiego. Dlatego bardzo dziękuję naszym absolwentom, inżynierom i strażakom, którzy ukończyli Studia Podyplomowe „Bezpieczeństwo Procesów Przemysłowych” w latach 1997-2016.

Książka jest przeznaczona dla analityków bezpieczeństwa procesowego przygotowujących dokumentację SEVESO, dla projektantów, inżynierów procesowych prowadzących instalacje procesowe i wdrażających nowe rozwiązania technologiczno-procesowe oraz zagadnienia zarządzania bezpieczeństwem, dla specjalistów z dziedziny ochrony pożarowej i ochrony środowiska a także dla brokerów ubezpieczeniowych. Może być również użyteczna dla wykładowców bezpieczeństwa procesowego, studentów inżynierii bezpieczeństwa pracy, inżynierii chemicznej i procesowej, ochrony środowiska oraz nowego kierunku kształcenia w zakresie zarządzania kryzysowego.

Obecnie chcę wyrazić szereg podziękowań dla instytucji i osób, które przyczyniły się do wydania tej książki. Na początek pragnę wymienić dwa polskie zakłady należące do grupy ORLEN, tj. PKN ORLEN SA i ANWIL SA, które są głównymi sponsorami tej książki i wsparły finansowo ten projekt, przy czym książkę tę dedykuję szczególnie inżynierom ANWIL SA, którzy obchodzą jubileusz 50-lecia. Nie bez znaczenia była zachęta i pomoc o różnym charakterze zakładów Grupy Azoty, Lotos SA, PZU-Lab, jak i firmy ASE Sp. z o.o. wydającej Magazyn Ex oraz Spółki BMP Sp. z o.o. redagującej kwartalnik Chemia Przemysłowa.

Bardzo dziękuję Panom recenzentom, prof. Kazimierzowi Lebeckiemu i prof. Romanowi Zarzyckiemu za wnikliwie i konstruktywne recenzje tej książki. Dziękuję Pani mgr inż. Annie Aulak za współpracę w zakresie przygotowania graficznego oraz Panu dr inż. Romualdowi Żyła za redakcję techniczną monografii.

Na zakończenie chciałabym również wymienić i gorąco podziękować mojej żonie Dobrochnie Markowskiej za cierpliwość, wyrozumiałość i wsparcie jakie uzyskiwałem w trakcie jej pisania.