

Strona czasopisma: <http://analit.agh.edu.pl/>

Przegląd największych katastrof chemicznych jako punktów zwrotnych w prawie i bezpieczeństwie

A review of major chemical disasters as turning points in law and safety

Dominika Łatka

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

ABSTRAKT: Skalowanie procesów chemicznych do skali przemysłowej rodzi poważne wyzwania techniczne. Ekstrapolacja parametrów metodą prób i błędów oraz niedoszacowanie ryzyka prowadziły w przeszłości do najpoważniejszych katastrof w historii. Artykuł stanowi analizę czterech fundamentalnych awarii przemysłu chemicznego, które miały miejsce w: Oppau, Flixborough, Seveso oraz Bopalu w latach 1921-1984. Omówiono w nim mechanizmy fizykochemiczne leżące u podstaw awarii, krytyczne błędy w skalowaniu procesów i zarządzaniu zmianą, a także bezpośrednie konsekwencje legislacyjne. Analiza tych przypadków dowodzi, że współczesne standardy bezpieczeństwa procesowego służące ochronie ludzi i środowiska są bezpośrednim wynikiem doświadczeń zdobytych w przeszłości.

ABSTRACT: The scale-up of chemical processes to an industrial level poses significant technical challenges. Trial-and-error extrapolation of parameters and underestimation of risk have led to some of the most serious disasters in history. This article presents an analysis of four fundamental chemical industry accidents that occurred in Oppau, Flixborough, Seveso and Bhopal between 1921 and 1984. It examines the underlying physicochemical mechanisms of these failures, critical errors in scaling up processes and in Management of Change, as well as the direct legislative consequences. The analysis of these cases demonstrates that contemporary process safety, environmental, and public health standards are the direct result of lessons learned from the past.

Słowa kluczowe: inżynieria chemiczna, skalowanie procesów, bezpieczeństwo procesowe, awarie przemysłowe, katastrofy chemiczne

1. Wstęp

Przeniesienie syntezy chemicznej ze skali laboratoryjnej do pełnoskalowej produkcji przemysłowej nie jest liniowym powiększeniem wymiarów aparatury [1]. Proces skalowania wiąże się ze zmianą kluczowych parametrów hydrodynamicznych i termokinetycznych układu [1,2].

1.1. Stosunek powierzchni do objętości

Głównym ograniczeniem fizycznym jest nieliniowy spadek stosunku powierzchni wymiany ciepła do objętości roboczej reaktora (A/V) wraz ze wzrostem jego wymiaru charakterystycznego. Wynika on z faktu, że objętość rośnie proporcjonalnie do sześcianu wymiarów liniowych ($V \propto r^3$), podczas gdy powierzchnia rośnie tylko proporcjonalnie do kwadratu ($A \propto r^2$). Wiąże się to z trudnościami z wymianą ciepła oraz kontrolą temperatury. Reakcje egzotermiczne mogą być szczególnie niebezpieczne, ze względu na uwalnianie dużej ilości energii. W małej kolbie laboratoryjnej generowane ciepło jest efektywnie odprowadzane przez jej ścianki. W reaktorach przemysłowych, o dużo większych objętościach, ta sama reakcja stwarza bezpośrednie ryzyko związane z niekontrolowanym przyrostem energii [2].

1.2. Homogeniczność

Kolejnymi wyzwaniem inżynierskim są ograniczenia w mieszaniu i transporcie substancji oraz mieszanin [1]. O ile w skali mikro uzyskanie pełnej homogeniczności produktu zwykle nie stanowi problemu, w skali makro pojawia się znacznie więcej ograniczeń wynikających ze zjawisk transportowych. Pojawiają się lokalne gradienty stężeń, martwe strefy i fluktuacje temperatur, które mogą wpływać na powstawanie niepożądanych produktów ubocznych. Mikromieszanie (w skali molekularnej) zachodzi poprzez dyfuzję cząsteczkową wewnątrz małych, wolnych od turbulencji elementów płynu, które są nieustannie odkształcane pod wpływem ścinania [3].

1.3. Analiza wymiarowa i liczby charakterystyczne

Zastosowanie analizy wymiarowej pozwala na uproszczenie złożonych problemów inżynierskich poprzez zgrupowanie wielu zmiennych procesowych (takich jak gęstość, lepkość, wymiary aparatury, prędkość) w kilka bezwymiarowych kryteriów. Zgodnie z teorią modeli, dwa procesy można uznać za całkowicie podobne, jeśli odbywają się w podobnej przestrzeni geometrycznej, a wszystkie opisujące je liczby bezwymiarowe mają tę samą wartość. W praktyce całkowite podobieństwo jest często niemożliwe do osiągnięcia przy zmianie skali, co zmusza inżynierów do stosowania tzw. podobieństwa częściowego, w którym priorytetyzuje się najważniejsze liczby charakterystyczne dla danego reżimu.

Liczba Reynoldsa (Re) pozwala ustalić reżim hydrodynamiczny - od laminarnego (dominacja lepkości), przez przejściowy, aż po turbulentny (tworzenie się wirów ułatwiających mieszanie). Dotyczy przepływu i mieszania, określa stosunek sił bezwładności do sił lepkości płynu i jest kluczowa dla obliczenia między innymi czasu wymieszania. W reżimie turbulentnym zapotrzebowanie mieszadła na moc staje się niezależne od liczby Reynoldsa, co znacząco ułatwia skalowanie procesu. Dlatego też w dużej skali korzystne jest utrzymanie odpowiednio wysokiej wartości Re gwarantującej przepływ turbulentny [4].

Liczba Froude'a (Fr) stanowi kryterium wpływu grawitacji i definiowana jest jako stosunek sił inercji do siły ciężkości. Jest krytyczna w układach wielofazowych różniących się gęstością oraz tam, gdzie istnieje swobodna powierzchnia cieczy (np. przy tworzeniu się leja pośrodku reaktora). Jednym z częstych problemów skalowania jest utrzymanie stałej liczby Reynoldsa i Froude'a jednocześnie. Przy zmianie rozmiaru reaktora jest to niemal niemożliwe ze względów matematycznych i fizycznych (wymagałoby to użycia płynu modelowego o abstrakcyjnie niskiej lepkości). Należy zatem zdecydować, która z sił bardziej dominuje w procesie i to na niej oprzeć skalowanie [4].

Kolejną ważną liczbą charakterystyczną jest liczba Pécleta (Pe) - określa stosunek szybkości transportu konwekcyjnego (wynikającego z przepływu płynu) do transportu dyspersyjnego lub dyfuzyjnego i stanowi kryterium transportu masy i ciepła. W transporcie masy określa stopień wymieszania wzdłużnego w reaktorach przepływowych. Wartość dążąca do nieskończoności oznacza idealny przepływ tłokowy (brak dyspersji), a dążąca do zera - idealne wymieszanie. Jest to kluczowe, aby przewidzieć spadek konwersji w rzeczywistym reaktorze przemysłowym względem modelu laboratoryjnego. W transporcie ciepła ma ogromne znaczenie w unikaniu ucieczek temperaturowych, pomagając skalować systemy chłodzenia proporcjonalnie do objętości płynu, który oddaje ciepło [5].

Kryterium wnikania ciepła stanowi liczba Nusselta (Nu). Wymiarowa analiza przepływu ciepła grupuje zmienne w liczbę Nusselta, która rozumiana jest jako stosunek ciepła przekazywanego na drodze konwekcji do ciepła przekazywanego przez przewodzenie (kondukcję). Ma istotne znaczenie przy projektowaniu chłodzenia oraz grzania dużych układów w oparciu o warunki hydrodynamiczne (liczbę Reynoldsa). Odpowiednie przeskalowanie Nu jest szczególnie ważne w przypadku reakcji egzotermicznych, gdyż mamy do czynienia z ograniczonym transferem ciepła przez płaszcz reaktorów, ze względu na spadek stosunku powierzchni do objętości [4,5].

Gdy rozważane jest kryterium kinetyczne, kluczowa będzie liczba Damköhlera (Da). Wyraża ona czas przebywania substratu w reaktorze względem czasu trwania reakcji. Pozwala ocenić, czy proces będzie ograniczony przez przepływ czy przez reakcję. Jeśli Da ma wartość poniżej 0.1, to konwersja wyniesie mniej niż 10% (reakcja jest bardzo wolna, a przepływ szybki). Jeśli wartość Da jest powyżej 10, konwersja przekroczy 90% (reakcja bardzo szybka). Utrzymanie podobnej wartości liczba Damköhlera gwarantuje podobny stopień przereagowania [4,5].

2. Oppau

Dnia 21 września 1921 roku w zakładach nawozów azotowych firmy BASF w Oppau (Niemcy) doszło do jednej z największych w historii eksplozji fazy stałej. Przedmiotem katastrofy był silos magazynowy nr 110, w którym składowano około 4500 ton nawozu azotowego – mieszaniny siarczanu amonu i azotan amonu w proporcji wagowej 50:50. Azotan amonu jest związkiem silnie higroskopijnym. Pod wpływem nacisku własnego ciężaru i wilgoci atmosferycznej, magazynowany materiał zbijał się w twardą, skalistą masę, uniemożliwiając uzyskanie materiału.

Powszechną procedurą ułatwiającą wydobycie było rozluźnianie struktury przyzmy za pomocą detonacji małych ładunków wybuchowych. Bezpieczeństwo tej metody poparto wcześniejszymi testami z 1919 roku, które wykazały, że mieszaniny zawierające poniżej 60% azotan amonu nie są podatne na detonację. Do dnia tragedii wykonano ponad 20 000 kontrolowanych wybuchów bez żadnych incydentów.

21 września rutynowa detonacja zainicjowała eksplozję, która zdetonowała około 10% całkowitego zapasu nawozu. Skutki były niszczycielskie: śmierć poniosło 561 osób, 1952 zostało rannych, a 80% zabudowy miejskiej Oppau uległo całkowitej destrukcji. Fala uderzeniowa została odnotowana przez aparaturę w Stuttgarcie oddalonym o 150 km, a huk eksplozji słyszano w Monachium w odległości 275 km.

Jako główną przyczynę uważa się modyfikacje wprowadzone w procesie kilka miesięcy przed wypadkiem. Zmniejszono poziom wilgotności (2% zamiast 3-4%), a także gęstość pozorną wytwarzanej mieszaniny. Dodatkowo należy brać pod uwagę możliwość, że materiał w silosie nie był jednorodny. Bardzo prawdopodobne, że obecne były strefy o zawartości azotan amonu bliższej lub powyżej 60%. Ekspertki stwierdzili, że te elementy mogły mieć ogromny wpływ na wybuchowość mieszaniny [6].

3. Flixborough

Eksplozja w zakładach Nypro w Flixborough (Anglia) z 1 czerwca 1974 roku stanowi przykład awarii wywołanej brakiem procedur Zarządzania Zmianą (ang. Management of Change – MOC) [2,7]. Fabryka produkowała kaprolaktam – półprodukt do wytwarzania nylonu, poprzez utlenianie cykloheksanu [7,8]. Proces przebiegał w kaskadzie sześciu reaktorów pracujących pod ciśnieniem 1 MPa i w temperaturze 150°C.

Dwa miesiące przed katastrofą w reaktorze nr 5 wykryto pęknięcie. Decyzją kierownictwa reaktor zdemontowano do naprawy. Aby nie przerywać ciągłości procesu, zaprojektowano i zainstalowano tymczasową rurę obejściową (ang. bypass) łączącą reaktor nr 4 bezpośrednio z reaktorem nr 6. Łącznik ten został wykonany pośpiesznie, bez przeprowadzenia jakichkolwiek obliczeń wytrzymałościowych czy uwzględnienia rozszerzalności cieplnej materiału. Do połączenia wykorzystano elastyczne łączniki mieszkowe, które nie były przystosowane do tak dużych obciążeń. Instalacji nie wyposażono w profesjonalne podpory konstrukcyjne, opierając ciężar rurociągu na prowizorycznym rusztowaniu budowlanym [2,7].

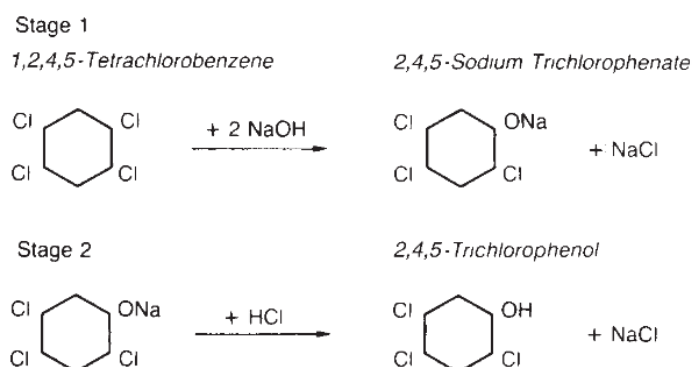
Podczas rozruchu instalacji 1 czerwca 1974 roku, na skutek wahań ciśnienia i temperatury, rura obejściowa uległa nagłemu rozerwaniu. W bardzo krótkim czasie do atmosfery uwolnione zostało od 30 do 40 ton cykloheksanu, który uległ natychmiastowemu rozprężeniu i odparowaniu. Powstała

gigantyczna chmura par, która po natrafieniu na źródło zapłonu (piec w innej części zakładu), uległa zapłonowi [7,8]. Doszło do potężnej eksplozji, której siła zabiła 28 pracowników (w większości obsadę sterowni, która znajdowała się najbliżej instalacji), zraniła setki osób oraz zrównała z ziemią cały kompleks przemysłowy i uszkodziła około 2000 domów poza granicami zakładu [9].

4. Seveso

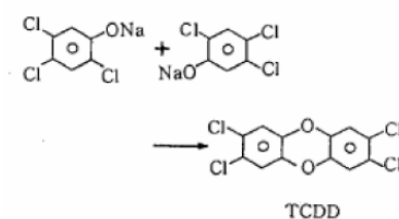
Katastrofa z lipca 1976 roku w fabryce ICMESA w Seveso (Włochy) pokazała ryzyko związane z produktami ubocznymi o wysokiej toksyczności. Zakład produkował 2,4,5-trichlorofenol (TCP) – substancję o właściwościach biobójczych. Produkcja ta prowadzi do powstania zanieczyszczeń w postaci dioksyn, w tym TCDD i TCDF.

TCP otrzymuje się w 2 etapach. Pierwszy z nich stanowi hydrolizę 1,2,4,5-tetrachlorobenzenu (1,2,4,5 TCB) pod ciśnieniem atmosferycznym i w temperaturze od 140 do 170°C (**Rysunek 1. Stage 1**). Glikol etylenowy jest stosowany jako rozpuszczalnik, a woda z układu jest usuwana przez destylację azeotropową z użyciem ksyłenu. Po zakończeniu reakcji odparowywane jest 50% glikolu, a mieszaninę chłodzi się do 50–60°C poprzez dodanie wody. Drugi etap polega na zakwaszeniu trichlorofenolanu sodu kwasem solnym w celu otrzymania trichlorofenolu (TCP), który na koniec oczyszcza się poprzez destylację (**Rysunek 1. Stage 2**).



Rysunek 1. Równania reakcji przedstawiające 2-etapowy proces otrzymywania TCP [10].

W obecności glikolu etylenowego i wodorotlenku sodu, w temperaturze 180°C może zostać wywołana słaba reakcja egzotermiczna, a następnie gwałtowny rozkład w temperaturze około 200°C z niekontrolowanym i nagłym wzrostem temperatury do 410°C, uwalniając ogromne ilości produktów gazowych. Reakcja ta jest wyzwalana przez wzrost temperatury w reaktorze, co powoduje rozkład mieszaniny reaktywnej i powstawanie dioksyn [10,11]. TCDD powstaje w wyniku kondensacji 2 cząsteczek 2,4,5-trichlorofenolu (**Rysunek 2.**). Poniżej 180°C produkcja toksycznego produktu ubocznego jest minimalna (ok. 1 ppm), jednak stężenie to znacznie wzrasta w wyższych temperaturach.



Rysunek 2. Równanie reakcji syntezy TCDD [12].

W dniu 9 lipca proces rozpoczęto później niż zwykle, około godziny 16:00. Po zakończeniu reakcji część glikolu etylenowego została oddestylowana, ale usunięta frakcja stanowiła tylko 15% zamiast standardowych 50%. Destylacja została przerwana, ogrzewanie przerwano, ale nie dodano wody w celu schłodzenia masy reakcyjnej do standardowego zakresu 50–60°C. Ostatnia zarejestrowana temperatura wyniosła 158°C. Zmiana zakończyła się 10 lipca o godzinie 6:00, co zbiegło się to z zamknięciem zakładu na weekend. Reaktor pozostawiono bez nadzoru.

Ponieważ reaktor był napełniony tylko do połowy, węzownica podgrzewała powietrze nad mieszaniną reakcyjną, co skutkowało wzrostem temperatury na powierzchni nieruchomej cieczy. Dodatkowo należy zauważyć, że w zakładzie odwrócono etapy procesu. Zgodnie z patentem destylację należy przeprowadzić po zakwaszeniu trichlorofenolu. W Seveso najpierw przeprowadzano destylację, a następnie zakwaszono, co doprowadziło do dłuższego okresu kontaktu mieszaniny glikolu etylenowego i sody kaustycznej z ciepłem oraz destylacji rozpuszczalnika w środowisko zasadowe zamiast kwaśnego [10,11]. Elementy te spowodowały, że w reaktorze doszło do rozwinięcia reakcji egzotermicznej, której towarzyszył gwałtowny wzrost temperatury i ciśnienia. Temperatura osiągnęła prawdopodobnie około 400°C - w tych warunkach wytworzyło się ciśnienie zdolne do rozerwania zaworu bezpieczeństwa. Chmura składająca się głównie z TCP, skażona dioksynami w ilości 16 kg, z czego 2 kg stanowiły TCDD, pojawiła się nad Seveso. Reakcja na katastrofę nastąpiła z opóźnieniem, ponieważ ze względu na weekend osoby odpowiedzialne były nieosiągalne. Ewakuowano ponad 700 mieszkańców, u licznych zdiagnozowano trądzik chlorowy – ciężką chorobę skóry będącą charakterystycznym objawem ostrego zatrucia dioksynami. Skażeniu uległ obszar o powierzchni 1500 hektarów. Masowo ginęły zwierzęta, a wielki obszar, w tym 40 zakładów i ogromne tereny rolne, zostały skażone i wyłączono z użytku na 10 lat. Padły tysiące zwierząt domowych i hodowlanych [13].

Tetrachlorodibenzodioksyna (TCDD) i tetrachlorodibenzofuran (TCDF) należą do grupy polichlorodibenzodioxyn. Substancje te nie pełnią żadnej funkcji, stanowią jedynie zanieczyszczenie przy syntezach chemicznych, ale też przy produkcji i bieleniu papieru oraz są obecne w spalinach samochodowych. Tetrachlorodibenzodioksyna (TCDD) jest uznawana za najbardziej toksyczną substancję pochodzącą z przemysłowej działalności człowieka. Dawka śmiertelna dla świnki morskiej wynosi zaledwie 0.5 µg/kg m. c.

5. Bhopal

Tragedia w Bhopalu (Indie) z grudnia 1984 roku w zakładzie pestycydów Union Carbide uznawana jest za najczarniejszą kartę w historii przemysłu chemicznego pod względem liczby ofiar. Fabryka syntezowała karbaryl przy użyciu wysoce reaktywnego i lotnego izocyjanianu metylu (MIC). Związek ten charakteryzuje się ekstremalną toksycznością i potencjałem egzotermicznej polimeryzacji oraz gwałtownej hydrolizy w kontakcie z wodą. Z tego powodu standardy bezpieczeństwa wymagały ciągłego chłodzenia zbiorników magazynowych MIC do temperatury bliskiej 0°C lub niższej, co drastycznie obniża kinetykę ewentualnych reakcji niepożądanych [2,13].

Na pół roku przed katastrofą podjęto decyzję o wyłączeniu pierwotnie stosowanej instalacji chłodniczej. Dodatkowo, podczas rutynowego płukania rurociągów, na skutek nieszczelnych zaworów odcinających, woda przedostała się bezpośrednio do podziemnego zbiornika zawierającego ponad 40 ton MIC. Woda zainicjowała gwałtowną, egzotermiczną reakcję z izocyjanianem, która przy braku chłodzenia przeszła w stan samo przyspieszenia, a wygenerowane ciśnienie rozszczelniło aparaturę [2].

Ponad 25 ton izocyjanianu metylu w postaci ciężkiej, przyziemnej mgły spowilo gęsto zaludnione dzielnice otaczające zakład. Związek ten łączy się ze składnikami tkanek, w szczególności reaguje z siarką zawartą w białku, niszczy wyściółkę płuc, przez co woda i krew z otaczających tkanek dostają się do płuc. Prowadzi to do obrzęku płuc, co grozi śmiercią przez uduszenie, ponieważ płuca ofiar są

wypełnione cieczą. Skutki tej katastrofy szacuje się na około 16 000 ofiar śmiertelnych, a ponad 100 000 doznało trwałego i poważnego uszczerbku na zdrowiu.

6. Wnioski i transformacja standardów bezpieczeństwa

Omówione katastrofy chemiczne wymusiły odejście od biernego podejścia do bezpieczeństwa na rzecz proaktywnego, systemowego zarządzania ryzykiem technologicznym. Najważniejsze informacje o wydarzeniach oraz ich wpływie zebrano w **Tabeli 1**.

Bezpośrednią reakcją na skażenie we Włoszech było uchwalenie przez Radę Europy w 1982 roku Dyrektywy 82/501/EWG, znanej jako Dyrektywa SEVESO I [13]. Po raz pierwszy nałożyła ona na zakłady przemysłowe, przechowujące określone ilości substancji niebezpiecznych, obowiązek powiadamiania władz o profilu produkcji i wdrożenia systemów zapobiegania awariom. Ewolucją tego prawa jest Dyrektywa SEVESO II (1996), kładąca nacisk na inspekcje i ochronę środowiska, oraz obecnie obowiązująca SEVESO III (Dyrektywa 2012/18/UE), która w pełni zharmonizowała klasyfikację substancji z globalnym systemem CLP/GHS oraz drastycznie zaostrzyła progi ilościowe dla substancji toksycznych i wybuchowych [13].

W Wielkiej Brytanii, skutkiem raportu z Flixborough było powołanie Komitetu Doradczego ds. Poważnych Zagrożeń (ACMH), którego prace zaowocowały wdrożeniem rygorystyczny krajowych przepisów CIMAH (1984), zastąpionych później przez system COMAH (Control of Major Accident Hazards). Regulacje te uważane są za odpowiednik europejskich Dyrektyw Seveso [7].

Wybuch w Oppau wpłynął na wprowadzenie norm dotyczących składowania substancji chemicznych, a także pokazał konieczność oceny ryzyka przed wprowadzaniem jakichkolwiek zmian do procesu. Podkreślone również zostało znaczenie planowania przestrzennego i tego jak ważne jest odpowiednie rozmieszczenie zakładów chemicznych, aby zapobiegać lub minimalizować skutkom potencjalnych awarii.

Katastrofa w Bopalu dała globalny impuls do wdrożenia standardów Process Safety Management, wprowadzonych m.in. przez amerykańską agencję OSHA (Occupational Safety and Health Administration) oraz Center for Chemical Process Safety (CCPS) [2,13]. Współczesny system PSM opiera się na filarach, wśród których kluczowe znaczenie mają:

- Zarządzanie Zmianą (MOC): każda, nawet najmniejsza modyfikacja techniczna, personalna lub proceduralna instalacji musi przejść rygorystyczną, wielodyscyplinarną ocenę ryzyka (np. metodami HAZOP) przed fizycznym wdrożeniem [2,7].
- Analiza Ryzyka Procesowego (PHA): identyfikacja scenariuszy awaryjnych z uwzględnieniem barier technicznych i ludzkich [2].
- Planowanie Przestrzenne: wprowadzenie bezwzględnie nakazu zachowania szerokich stref buforowych dzielących zakłady dużego ryzyka od terenów mieszkaniowych, zapobiegając powtórzeniu scenariusza z Bopalu i Oppau [6,13] (**Tabela 1**). Podsumowanie wydarzeń w Oppau, Flixborough, Seveso oraz Bhopalu.

Tabela 1. Podsumowanie wydarzeń w Oppau, Flixborough, Seveso oraz Bhopalu.

Miejsce i rok	Oppau (Niemcy, 1921)	Flixborough (Wielka Brytania, 1974)	Seveso (Włochy, 1976)	Bhopal (Indie, 1984)
Substancja chemiczna	Azotan amonu i siarczan amonu	Cykloheksan	Tetrachlorodibenzodioksyna	Izocyjanian metylu
Wydarzenie	Eksplozja ok. 4,5 tys. ton nawozu	Eksplozja par cykloheksanu	Uwolnienie chmury toksycznych dioksyn	Wyciek toksycznego gazu
Główne przyczyny	Używanie ładunków wybuchowych do rozbijania zbrylonego nawozu. Zmiana parametrów mieszanki bez oceny bezpieczeństwa.	Provizoryczna naprawa wykonana bez odpowiednich obliczeń. Pęknięcie rurociągu.	Przedwczesne przerwanie procesu przed weekendem. Przegrzanie reaktora i rozszczelnienie zaworu bezpieczeństwa bezpośrednio do atmosfery.	Przedostanie się wody do zbiornika (reakcja egzotermiczna). Wyłączone lub niesprawne systemy bezpieczeństwa.
Konsekwencje	<ul style="list-style-type: none"> • 561 ofiar śmiertelnych • ok. 2 tys. rannych • zniszczenie 80% zabudowy w Oppau 	<ul style="list-style-type: none"> • 28 ofiar śmiertelnych • setki rannych • całkowite zniszczenie zakładu i 2 tys. domów wokół 	<ul style="list-style-type: none"> • brak ofiar śmiertelnych wśród ludzi • trądzik chlorowy u licznych • masowy pomór zwierząt i skażenie obszaru o pow. 1500 ha 	<ul style="list-style-type: none"> • ok. 16 tys. ofiar śmiertelnych • > 100 tys. uszkodzonych • skażenie środowiska
Regulacje	Normy dotyczące składowania azotanu amonu	Komitet Doradczy ds. Poważnych Zagrożeń (ACMH), Przepisy CIMAH, system COMAH	Dyrektywy SEVESO	Standardy bezpieczeństwa procesowego (PSM)

7. Podsumowanie i wnioski

Historia inżynierii chemicznej pokazuje, że bezpieczeństwo nie jest stanem stałym, lecz dynamicznym procesem ciągłej weryfikacji. Katastrofy w Oppau, Flixborough, Seveso i Bopalu dowiodły, że drobne zmiany parametrów fizycznych, niedopuszczalne skróty inżynierskie, brak dogłębnej analizy reakcji ubocznych czy zaniedbania systemów ochronnych generują ryzyka o skali masowej. Współczesna legislacja i standardy bezpieczeństwa procesowego bezpośrednio opierają się na wnioskach wyciągniętych z tych tragedii.

Literatura

- [1] Bell T. A., Challenges in the scale-up of particulate processes - an industrial perspective, Powder Technology 150 (2005) 60–71
- [2] Kletz T., What Went Wrong? - Case Histories of Process Plant Disasters and How They Could Have Been Avoided, wyd. Elsevier, (2019) 20–29
- [3] Angst W., Bourne J.R., Dell'ava P., Mixing and fast chemical reaction—IX: Comparison between models and experiments, Chemical Engineering Science, Volume 39, Issue 2, (1984), 335-342
- [4] Levin M., Pharmaceutical Process Scale-Up. Drugs and the Pharmaceutical Sciences, CRC Press, (2001), 14-15, 19-21, 44-46, 59-62
- [5] Fogler H. S., Elements of Chemical Reaction Engineering, Fifth edition, Pearson, 2016, 852-862
- [6] French Ministry of the Environment - DPPR / SEI / BARPI. Explosion in a nitrogenous fertiliser plant | 21 September 1921 | Oppau – Germany, ARIA Database, No. 14373, 2008
- [7] Parker R. J., Great Britain Department of Employment, The Flixborough Disaster: Report of the Court of Inquiry, London: H.M.S.O., 1975.
- [8] Sadee C., Samuels D.E., O'Brien T.P., The characteristics of the explosion of cyclohexane at the Nypro (UK) Flixborough plant on 1st June 1974, Journal of Occupational Accidents, 1 (3), 1977, 203–235.
- [9] Mistry P., Flixborough chemical plant disaster 'not forgotten' 50 years on, BBC News, 2024.
- [10] Mannan S., 'Lees' Loss Prevention in the Process Industries', Volumes 1-3 (3rd Edition) - Appendix 3: Seveso, Elsevier, 2005

- [11] French Ministry of the Environment - DPPR / SEI / BARPI. Seveso accident: release of dioxins into the atmosphere in a chemical plant | 10 July 1976 | Meda – [Lombardy] Italy, ARIA Database, No. 5620, 2008
- [12] <https://www.shippai.org/fkd/en/hfen/HC1300002.pdf> (dostęp 06.06.26)
- [13] Timbrell J., *Paradoks trucizn: substancje chemiczne przyjazne i wrogie*, wyd. WNT, Warszawa (2014) 126–129, 175.