



gekko
photonics

WHITE PAPER

08/2025

POMIARY INLINE W
PRODUKCJI ŻYWIC
SYNTETYCZNYCH:

OSZCZĘDNOŚĆ
SUROWCÓW,
OPTYMALIZACJA
ZUŻYCIA ENERGII
I ZGODNOŚĆ Z
REGULACJAMI UE

www.gekkophotonics.com

Streszczenie

Produkcja żywic syntetycznych w Europie podlega dziś coraz bardziej złożonym regulacjom środowiskowym i procesowym. Przedsiębiorstwa z tej branży muszą nie tylko zarządzać rosnącą presją kosztową, ograniczać zużycie surowców i energii, ale również spełniać rygorystyczne wymogi prawne w zakresie identyfikowalności, raportowania i minimalizacji wpływu na środowisko. Tradycyjne systemy oparte na ręcznym pobieraniu próbek i analizach laboratoryjnych często nie nadążają za szybkością i złożonością współczesnych procesów produkcyjnych, co utrudnia spełnienie wymagań regulacyjnych i efektywne zarządzanie procesem w czasie rzeczywistym.

Brak bieżącego monitoringu zużycia surowców, energii oraz parametrów kluczowych dla przebiegu reakcji chemicznych prowadzi do strat materiałowych, wyższego poziomu odpadów oraz trudności w szybkim raportowaniu zgodnym z unijnymi wymogami. Przedsiębiorstwa stoją dziś przed koniecznością wdrażania technologii umożliwiających natychmiastowe reagowanie na zmiany procesowe i zapewniających zgodność operacyjną z europejskim prawodawstwem.

Trzy najważniejsze mechanizmy regulacyjne

1. **CSRD** – Corporate Sustainability Reporting Directive: Nowy obowiązek szczegółowego raportowania danych środowiskowych, w tym zużycia energii, surowców, odpadów i emisji w całym łańcuchu wartości.
2. **REACH** – Rozporządzenie o chemikaliach: Wymóg pełnej identyfikowalności surowców i produktów chemicznych oraz bieżącej kontroli ich składu i zgodności procesowej.
3. **Waste Framework Directive i Circular Economy Action Plan**: Konieczność ograniczenia ilości odpadów technologicznych, wdrażania gospodarki o obiegu zamkniętym i raportowania efektywności surowcowej.

Dwa kluczowe wnioski

1. Monitoring inline procesów w czasie rzeczywistym staje się niezbędny do zapewnienia zgodności z regulacjami UE i ograniczenia ryzyk operacyjnych.
2. Bieżąca kontrola zużycia surowców i energii wspiera nie tylko zgodność prawną, ale również zwiększa efektywność kosztową przedsiębiorstwa.

Spis treści:

Spis treści:	3
Glosariusz	6
Wstęp	9
1.Regulacje UE wpływające na przemysł żywic syntetycznych	10
1.1. REACH – Rejestracja, Ocena, Autoryzacja i Ograniczenie Chemikaliów	17
1.2. CSRD – Dyrektywa o Raportowaniu Zrównoważonego Rozwoju	18
1.3. Waste Framework Directive	19
1.4. Circular Economy Action Plan	20
1.5. Energy Efficiency Directive	20
1.6. Stabilność regulacyjna i koszty zgodności	21
2.Koncepcja Quality 4.0: Nowoczesne zarządzanie jakością w przemyśle chemicznym	23
2.1. Definicja i podstawowe założenia Quality 4.0	24
2.2. Kluczowe komponenty Quality 4.0 w przemyśle chemicznym	24
2.3. Praktyczne zastosowanie Quality 4.0 w produkcji żywic syntetycznych	26
Monitorowanie surowców w czasie rzeczywistym	26
Kontrola procesów chemicznych inline	26
Automatyczne raportowanie zgodności	27
2.4 Korzyści biznesowe wynikające z wdrożenia rozwiązań Quality 4.0 w produkcji żywic syntetycznych	27
Zwiększenie efektywności operacyjnej	27
Zmniejszenie ryzyka niezgodności i kosztów odpadów	27
Usprawnienie zgodności regulacyjnej	28
Wzrost konkurencyjności i zaufania klientów	28
Możliwość rozwoju produktów ekologicznych	28
3.Porównanie metod pomiaru jakości w przemyśle chemicznym: Offline, Atline, Online, Inline	27
3.1. Pomiar Offline	30
3.2. Pomiar Atline	30
3.3. Pomiar Online	31
3.4. Pomiar Inline	32
3.5. Tabela porównawcza metod pomiarowych	33
3.6. Znaczenie pomiarów Inline i Online dla zgodności z regulacjami UE	34
4.Spektroskopia Ramana - kluczowa technologia w kontroli produkcji żywic syntetycznych	33
4.1. Zasada działania spektroskopii Ramana	35
4.2. Zastosowanie spektroskopii Ramana w produkcji żywic syntetycznych	36

Kontrola jakości surowców 35	37
Monitorowanie procesów polimeryzacji 35	37
Kontrola jakości produktu gotowego 35	37
Recykling i kontrola materiałów wtórnych 36	37
4.3. Kluczowe zalety spektroskopii Ramana w kontekście produkcji żywic syntetycznych 36	38
Szybkość i natychmiastowy dostęp do wyników 36	38
Nieniszczący charakter analizy 36	38
Wysoka specyficzność i czułość 36	38
Możliwość zastosowania inline 36	38
4.4. Wsparcie zgodności z regulacjami UE 36	39
5. Technologia Spectrally: Przewaga operacyjna i zgodność regulacyjna 38	41
5.1. Opis technologii Spectrally 40	42
Kluczowe elementy systemu Spectrally: 40	42
5.2. Główne zalety systemu Spectrally 40	42
Pełna zgodność z Quality 4.0 40	42
Wysoka precyzja i szybkość pomiarów 40	43
Modularność i skalowalność 40	43
5.3. Przewagi konkurencyjne systemu Spectrally 40	43
Bezpośrednia integracja z linią produkcyjną 40	43
Algorytmy samouczące (Machine Learning) 41	43
Gotowość do raportowania ESG 41	44
Elastyczność wdrożeniowa 41	44
5.4. Porównanie Spectrally z tradycyjnymi metodami analitycznymi 41	44
5.5. Wsparcie dla realizacji celów zrównoważonego rozwoju 42	45
6. Case study: Wdrożenie analizatora Spectrally inline w produkcji żywic syntetycznych 43	46
6.1. Profil zakładu produkcyjnego 44	46
6.2. Zakres wdrożenia systemu Spectrally 44	46
6.3. Wyzwania produkcyjne przed wdrożeniem Spectrally 44	47
6.4. Proces implementacji systemu Spectrally 45	48
Etap 1: Studium wykonalności 45	48
Etap 2: Identyfikacja procesu i punktów kontrolnych 45	48
Etap 3: Rekomendacje wdrożeniowe 45	48
Etap 4: Prace technologiczne i dostosowanie systemu 45	48
Etap 5: Wdrożenie na produkcji i szkolenia 45	48
Etap 6: Wsparcie powdrożeniowe 45	48
6.5. Wyniki wdrożenia i uzyskane korzyści 45	49
6.6. Wpływ wdrożenia na zgodność z regulacjami UE i raportowanie ESG 46	50
7. Wytyczne wdrożeniowe: Jak skutecznie zaimplementować analizator Spectrally w produkcji żywic syntetycznych 47	51
7.1. Etapy wdrożenia technologii Spectrally 49	52

Etap 1: Studium wykonalności 49	52
Etap 2: Identyfikacja procesu produkcyjnego i kontroli jakości 49	52
Etap 3: Opracowanie rekomendacji wdrożeniowych 49	52
Etap 4: Przygotowanie planu wdrożenia 49	53
Etap 5: Prace technologiczne i dostosowanie systemu 49	53
Etap 6: Wdrożenie na produkcji, kalibracja i szkolenie personelu 50	53
Etap 7: Wsparcie powdrożeniowe i rozwój systemu 50	53
7.2. Kluczowe czynniki sukcesu wdrożenia 50	54
Współpraca interdyscyplinarna 50	54
Zarządzanie zmianą 50	54
Zapewnienie jakości danych 50	54
Realistyczne planowanie zakresu wdrożenia 51	55
7.3. Najczęstsze błędy wdrożeniowe i jak ich unikać 51	55
Błąd 1: Ograniczenie wdrożenia tylko do jednego etapu procesu 51	55
Błąd 2: Niedostateczne zaangażowanie operatorów i personelu produkcyjnego 51	55
Błąd 3: Ograniczona weryfikacja i brak dostosowania systemu do rzeczywistych warunków produkcyjnych 51	56
Podsumowanie i wnioski 52	57
Bibliografia 54	58

Glosariusz

Termin / skrót	Objaśnienie
REACH	Rozporządzenie UE dot. rejestracji, oceny, udzielania zezwoleń i ograniczeń w zakresie chemikaliów; reguluje wprowadzanie substancji na rynek UE oraz obowiązki producentów i importerów.
SVHC	Substances of Very High Concern – substancje budzące szczególnie duże obawy (np. CMR, PBT/vPvB), identyfikowane na liście kandydackiej REACH.
CSRD	Dyrektywa o sprawozdawczości przedsiębiorstw w zakresie zrównoważonego rozwoju; rozszerza i ujednolica obowiązki raportowe (ESG).
ESG	Environmental, Social, Governance – środowisko, społeczeństwo i ład korporacyjny; trzy filary oceny zrównoważonego rozwoju w raportowaniu i zarządzaniu.
ESRS	Europejskie Standardy Sprawozdawczości Zrównoważonego Rozwoju – szczegółowe standardy techniczne do raportowania wg CSRD.
WFD	Waste Framework Directive – Ramowa Dyrektywa Odpadowa 2008/98/WE (z późn. zm.), ustanawia hierarchię postępowania z odpadami, „end-of-waste” itp.
CEAP	Circular Economy Action Plan – Plan działania UE dla gospodarki o obiegu zamkniętym (dokument programowy Komisji; nie jest aktem wiążącym).

EED	Dyrektywa o efektywności energetycznej (recast 2023/1791); wprowadza m.in. nowe cele oszczędności energii.
EU ETS	Unijny system handlu uprawnieniami do emisji (dyrektywa 2003/87/WE z nowelizacjami); „cap-and-trade” dla emisji GHG.
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism – mechanizm dostosowywania cen na granicach z uwzględnieniem emisji CO ₂ ; obejmuje import wybranych towarów.
WEE	Waste Electrical and Electronic Equipment – zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny (dyrektywa 2012/19/UE); w dokumencie przywołany jako źródło frakcji plastików.
Quality 4.0	Zastosowanie narzędzi Przemysłu 4.0 (IoT, AI/ML, analiza danych) do jakości, kontroli procesów i zgodności.
Inline / Online / At-line / Off-line	Klasy pomiarów/analityki procesu: inline – czujnik w strumieniu; online – poza strumieniem, ale w pętli ciągłej; at-line – blisko procesu, na próbce; off-line – w laboratorium.
PAT	Process Analytical Technology – filozofia i zestaw technik do monitorowania/kontroli jakości w czasie rzeczywistym.
SCADA / MES	Systemy nadzoru i akwizycji danych / systemy zarządzania produkcją; integrują pomiary i sterowanie w zakładach.
QMS	Quality Management System – system zarządzania jakością (procedury, audyty, rejestry).

API	Interfejs programistyczny do integracji danych/sygnałów (np. ze SCADA/MES).
OPC UA / MQTT	Standardy/protokoły wymiany danych w przemyśle do łączenia urządzeń i systemów.
IoT	Internet Rzeczy – sieć czujników/urządzeń zbierających dane procesowe.
AI / ML	Sztuczna inteligencja / uczenie maszynowe – metody analizy i predykcji w sterowaniu procesem/QA.
End-of-Waste (EoW)	„Utrata statusu odpadów” – moment, gdy materiał spełnia kryteria i przestaje być odpadem (wg WFD).
CAPEX / OPEX / ROI	Nakłady inwestycyjne / koszty operacyjne / zwrot z inwestycji – wskaźniki ekonomiczne projektów (np. automatyzacji pomiarów).

Wstęp

Przemysł chemiczny, w tym segment produkcji żywic syntetycznych, znajduje się dziś pod silną presją wynikającą ze stale rosnących wymagań regulacyjnych oraz rosnącej odpowiedzialności środowiskowej i społecznej. Unia Europejska wprowadza coraz bardziej szczegółowe regulacje, które nakładają na przedsiębiorstwa obowiązki znacznie wykraczające poza tradycyjne podejście do produkcji. W centrum tych zmian znajdują się dyrektywy takie jak REACH, CSRD, Waste Framework Directive, Circular Economy Action Plan oraz Energy Efficiency Directive, które istotnie kształtują sposób zarządzania procesami chemicznymi w Europie.

Obowiązujące i nadchodzące przepisy wymagają od producentów nie tylko znajomości i kontroli składu chemicznego stosowanych surowców, ale również bieżącego monitorowania zużycia energii, poziomu generowanych odpadów, a także ścisłego przestrzegania zasad gospodarki w obiegu zamkniętym. W praktyce oznacza to konieczność pełnej identyfikowalności procesów produkcyjnych oraz systematycznego raportowania wskaźników środowiskowych.

Wśród największych wyzwań stojących przed producentami żywic syntetycznych znajdują się:

- **Zapewnienie zgodności z przepisami środowiskowymi i chemicznymi przy coraz bardziej złożonych formułacjach produktów.**
- **Ograniczanie zużycia surowców i energii w warunkach rosnących cen oraz presji związanej ze zrównoważoną produkcją.**
- **Minimalizacja ilości odpadów technologicznych oraz poprawa efektywności procesów w kontekście wymagań gospodarki cyrkularnej.**
- **Spełnienie wymogów dyrektywy CSRD w zakresie szczegółowego raportowania wpływu działalności przedsiębiorstwa na środowisko.**
- **Konieczność szybkiego reagowania na odchylenia procesowe w celu ograniczania strat i ryzyka niezgodności**

Tradycyjne metody kontrolowania parametrów procesowych oparte na ręcznym pobieraniu próbek i analizach laboratoryjnych często okazują się niewystarczające w obliczu złożoności współczesnych procesów produkcyjnych. Długi czas oczekiwania na wyniki oraz ryzyko błędów ludzkich to istotne bariery ograniczające zdolność przedsiębiorstw do dynamicznego reagowania na zmiany w procesie.

Celem niniejszego opracowania jest **przedstawienie aktualnych ram regulacyjnych** kształtujących działalność przemysłu żywic syntetycznych oraz omówienie wyzwań, z jakimi muszą mierzyć się producenci w kontekście zmieniających się przepisów. Dokument ten ma również na celu wskazanie, jak **nowoczesne podejścia do monitorowania procesów mogą wspierać przedsiębiorstwa w osiągnięciu zgodności regulacyjnej oraz zwiększaniu efektywności produkcyjnej.**

Celem niniejszego opracowania jest **przedstawienie aktualnych ram regulacyjnych** kształtujących działalność przemysłu żywic syntetycznych oraz omówienie wyzwań, z jakimi muszą mierzyć się producenci w kontekście zmieniających się przepisów. Dokument ten ma również na celu wskazanie, jak **nowoczesne podejścia do monitorowania procesów mogą wspierać przedsiębiorstwa w osiągnięciu zgodności regulacyjnej oraz zwiększaniu efektywności produkcyjnej.**

ROZDZIAŁ

1

REGULACJE UE
WPŁYWAJĄCE NA
PRZEMYSŁ ŻYWIC
SYNTETYCZNYCH

Streszczenie rozdziału:

Unijne akty prawne stanowią dziś główne ramy gry rynkowej dla producentów żywic syntetycznych. Rozdział przedstawia pięć kluczowych regulacji — REACH, CSRD, Waste Framework Directive, Circular Economy Action Plan oraz Energy Efficiency Directive — wyjaśniając, jak każda z nich przekłada się na konkretne obowiązki operacyjne: pełną identyfikowalność surowców, bieżący monitoring zużycia energii i odpadów, rozszerzone raportowanie ESG oraz systematyczne podnoszenie efektywności procesów.

Autorzy podkreślają wspólny mianownik regulacji: dążenie do redukcji wpływu środowiskowego w całym cyklu życia produktu i przeniesienie odpowiedzialności na producenta. Analiza wskazuje, że rosnąca złożoność przepisów wymusza integrację technologii pomiarów w czasie rzeczywistym oraz automatyzację raportowania, co minimalizuje ryzyko kar i tworzy przewagę kosztową.

Zestawienie pięciu kluczowych regulacji UE przedstawia złożony system wymagań, którym muszą sprostać producenci żywic syntetycznych w Europie. Tabela 1 poniżej syntetyzuje najważniejsze aspekty omawianych dyrektyw i rozporządzeń.

Regulacja	Główne wymagania	Wpływ na producentów żywic syntetycznych
REACH	Rejestracja, ocena i kontrola chemikaliów	Obowiązek pełnej dokumentacji substancji, kontrola SVHC, analiza ryzyka
CSRD	Raportowanie zrównoważonego rozwoju	Obowiązek szczegółowego raportowania ESG, audyt danych środowiskowych

Waste Framework Directive	Hierarchia zarządzania odpadami	Minimalizacja odpadów, monitorowanie przepływu odpadów, raportowanie
Circular Economy Action Plan	Gospodarka o obiegu zamkniętym	Promowanie recyklingu, ekoprojektowanie, cyfrowe paszporty produktów
Energy Efficiency Directive	Efektywność energetyczna	Audyty energetyczne, optymalizacja procesów, wdrażanie ISO 50001

Tabela 1: Wpływ kluczowych regulacji UE na produkcję żywic syntetycznych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: European Chemicals Agency (2023); European Commission (2018, 2020a, 2020b, 2022, 2023); European Parliament (2022a, 2022b, 2022c)

Produkcja żywic syntetycznych podlega wielowymiarowym regulacjom, które obejmują kontrolę stosowanych substancji chemicznych, efektywność energetyczną, gospodarowanie odpadami oraz transparentność raportowania środowiskowego. Wymogi te nie tylko zwiększają odpowiedzialność przedsiębiorstw, ale również stwarzają presję na wdrażanie nowoczesnych systemów monitorowania i zarządzania procesami.

Technologie Quality 4.0 oraz spektroskopia Ramana, szczególnie w rozwiązaniach zintegrowanych, stanowią odpowiedź na rosnące wyzwania regulacyjne. Umożliwiają one ciągłą kontrolę procesów w czasie rzeczywistym, zapewniają wysoką jakość danych niezbędnych do raportowania ESG oraz wspierają optymalizację energetyczną i minimalizację odpadów.

W kolejnej sekcji szczegółowo omówione zostaną zasady działania i komponenty Quality 4.0, ze szczególnym uwzględnieniem ich zastosowania w przemyśle chemicznym, w tym w produkcji żywic syntetycznych.

Weryfikacja regulacyjna kluczowych aktów UE w kontekście produkcji żywic syntetycznych

Poniższe zestawienie (Tabela 2) przedstawia aktualny status prawny najważniejszych unijnych regulacji mających bezpośredni wpływ na branżę żywic syntetycznych. Dla każdej z nich wskazano stan obowiązywania w Unii Europejskiej oraz w Polsce, a także dodatkowe uwagi dotyczące terminów przejściowych, wyjątków lub planowanych nowelizacji. Tabela stanowi praktyczne narzędzie dla kadry zarządzającej, działów jakości, compliance i ESG, umożliwiające szybkie określenie, które przepisy wymagają bieżącej uwagi oraz jakie działania wdrożeniowe należy podjąć, aby zapewnić pełną zgodność operacyjną.

Legenda statusów: *W pełni* – akt obowiązuje w UE (dla dyrektyw: na poziomie UE jest w mocy, ale wymaga transpozycji do prawa krajowego); *Częściowo* – etap przejściowy / niepełna transpozycja / oczekiwane akty wykonawcze; *Jeszcze nie* – brak wejścia w życie/oczekiwanie na finalizację legislacji.

Nazwa i numer aktu	Status obowiązywania w UE (z datami)	Status obowiązywania w Polsce (z datami)	Uwagi (amendменты, wyjątki, terminy)
REACH – Rozporządzenie (WE) nr 1907/2006	W pełni – obowiązuje od 1.06.2007; ciągłe nowelizacje (załączniki, ograniczenia).	W pełni – rozporządzenie stosowane bezpośrednio; egzekwowanie i organy krajowe określa m.in. Ustawa z 25.02.2011 o substancjach chemicznych i ich mieszaninach; organem kompetentnym jest m.in. Biuro ds. Substancji Chemicznych.	Regularne aktualizacje listy SVHC i ograniczeń; brak polskich „okresów przejściowych” poza mechanizmami przewidzianymi w samym REACH.

CSRD – Dyrektywa (UE) 2022/2464	W pełni – dyrektywa obowiązuje od 5.01.2023; wejście w stosowanie etapami: za rok obrotowy 2024 (duże JZP wcześniej objęte NFRD), 2025 (duże), 2026 (MSP notowane, z opcją opt-out do 2028), 2028 (grupy spoza UE spełniające progi).	Częściowo – Polska przyjęła nowelizację ustawy o rachunkowości wdrażającą CSRD (ustawa podpisana 9.01.2025), ale wg KE (22.05.2025) wciąż toczy się postępowanie za brak/niepełną notyfikację środków transpozycji.	ESRS przyjęto aktem delegowanym 2023/2772 (stosowanie od 1.01.2024); 11.07.2025 KE przyjęła „quick fix” upraszczający ESRS/ujawnienia.
Ramowa Dyrektywa Odpadowa – 2008/98/WE (z nowelą 2018/851)	W pełni – 2008/98/WE w mocy; nowela 2018/851 weszła w życie 4.07.2018; trwają dalsze prace dot. m.in. tekstyliów/odpadów w żywności.	W pełni – transpozycja głównie przez Ustawę z 14.12.2012 o odpadach (z licznymi nowelami, tekst jedn.) oraz akty wykonawcze.	5.07.2023 KE przedstawiła projekt zmiany WFD w zakresie tekstyliów i celów redukcji marnowania żywności; proces legislacyjny w toku.
EED – Dyrektywa (UE) 2023/1791 (recast)	W pełni (na poziomie UE) – wchodzi w życie 10.10.2023; transpozycja do 11.10.2025 (niektóre artykuły mają inne daty stosowania).	Jeszcze nie (w pełni) – do 11.10.2025 Polska powinna dokonać pełnej transpozycji; prace legislacyjne trwają.	Dyrektywa podnosi cele oszczędności energii i rozszerza obowiązki sektora publicznego.

EU ETS – Dyrektywa 2003/87/WE (zm. 2023/959) + MSR (2015/1814)	W pełni – system działa; reforma Fit for 55 (2023/959) m.in. wprowadza ETS2 (transport/budynki od 2027) i wygaszanie bezpłatnych uprawnień 2026–2034.	W pełni – implementacja przez Ustawę z 12.06.2015 o systemie handlu uprawnieniami do emisji GHG (tekst jedn. 2024 i kolejne nowele).	Rezerwa stabilności rynkowej (MSR) uregulowana decyzją 2015/1814; w PL zapowiedziano kolejne dostosowania do reformy ETS.
CBAM – Rozporządze nie (UE) 2023/956	Częściowo – faza przejściowa 1.10.2023–31.12.2025 (obowiązki sprawozdawcze); pełne stosowanie od 1.01.2026 (obowiązek zakupu certyfikatów, autoryzowani zgłaszający).	W pełni (dot. fazy przejściowej) – w PL działa rejestr i ścieżki przez PUESC; KOBiZE pełni funkcje w systemie CBAM/NCAs.	KE prowadzi korekty pod kątem fazy finansowej (np. doprecyzowanie progów/obowiązków) – propozycje zmian z 2025 r. w toku.
EU Taxonomy – Rozporządze nie (UE) 2020/852	W pełni – w mocy od 2020; obowiązki ujawnieniowe stosowane od 2022; w 2025 r. przyjęto akt delegowany upraszczający raportowanie (zmiany do aktów klimatycznych/środowiskowych).	W pełni – rozporządzenie stosowane bezpośrednio; brak wymogu transpozycji.	Zakres i KPI doprecyzowują akty delegowane (klimatyczny, środowiskowy, ujawnieniowy).

WEEE – Dyrektywa 2012/19/UE	W pełni – dyrektywa obowiązuje; reguluje gospodarowanie ZSEE.	W pełni – transpozycja przez Ustawę z 11.09.2015 o zużyтым sprzęcie elektrycznym i elektronicznym (tekst jedn./nowele).	
CEAP – Plan działania GOZ (COM(2020) 98)	Dokument programowy (niewiążący) – wytycza kierunki (np. DPP), a ich wdrożenie następuje aktami prawnymi (np. ESPR/PPWR, itp.).	—	W kontekście „cyfrowych paszportów produktów” podstawą prawną jest m.in. rozporządzenie ramowe o ekoprojekcie (ESPR) przyjęte w 2024 r.; wdrażanie następuje przez akty delegowane dla grup produktów.

Tabela 2: Status wdrożenia kluczowych regulacji UE w sektorze żywic syntetycznych
Źródło: Opracowanie własne na podstawie źródeł urzędowych UE oraz administracji polskiej

1.1 Regulacje UE wpływające na przemysł żywic syntetycznych

REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) jest jednym z najważniejszych aktów prawnych dotyczących zarządzania chemikaliami w Unii Europejskiej. Rozporządzenie REACH (WE) nr 1907/2006 weszło w życie w 2007 roku i od tego czasu stanowi podstawę dla bezpiecznego stosowania substancji chemicznych w całym Europejskim Obszarze Gospodarczym (European Chemicals Agency, 2023).

Podstawowym celem REACH jest zapewnienie wysokiego poziomu ochrony zdrowia ludzkiego i środowiska poprzez identyfikację oraz kontrolę ryzyka związanego ze stosowaniem substancji chemicznych. REACH nakłada na producentów i importerów **obowiązek rejestracji wszystkich substancji wytwarzanych lub importowanych w ilościach powyżej jednej tony rocznie**. W przypadku żywic syntetycznych producenci muszą szczegółowo dokumentować skład, właściwości toksykologiczne, sposób użytkowania oraz środki zarządzania ryzykiem (European Chemicals Agency, 2023).

Dla producentów żywic syntetycznych szczególne znaczenie ma obowiązek ścisłej kontroli stosowanych monomerów, katalizatorów i dodatków chemicznych. Substancje uznane za szczególnie niebezpieczne (SVHC – Substances of Very High Concern) podlegają procedurze autoryzacji, a ich stosowanie może zostać ograniczone lub całkowicie zakazane. Proces uzyskiwania autoryzacji jest czasochłonny i kosztowny, co sprawia, że producenci coraz częściej poszukują alternatywnych, bezpieczniejszych substancji lub technologii umożliwiających minimalizację ich stosowania (European Commission, 2020b).

REACH promuje substytucję niebezpiecznych substancji oraz wymaga wdrożenia systemów umożliwiających pełną identyfikowalność surowców i produktów na wszystkich etapach łańcucha dostaw. Z tego względu wdrażanie rozwiązań Quality 4.0, takich jak monitoring w czasie rzeczywistym, analityka danych oraz spektroskopia Ramana, zyskuje na znaczeniu jako element zapewnienia zgodności z wymaganiami rejestracyjnymi i kontrolnymi (Antony et al., 2020).

1.2 CSRD – Dyrektywa o Raportowaniu Zrównoważonego Rozwoju

Dyrektywa CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) to jeden z kluczowych filarów nowego pakietu legislacyjnego Unii Europejskiej dotyczącego zrównoważonego rozwoju. Nowa regulacja, która zastępuje wcześniejszą NFRD (Non-Financial Reporting Directive), znacząco rozszerza zakres obowiązków sprawozdawczych dotyczących kwestii środowiskowych, społecznych i ładu korporacyjnego (ESG) (European Parliament, 2022b).

CSRD wprowadza istotne zmiany w zakresie podmiotów zobowiązanych do raportowania – obejmuje duże spółki giełdowe, firmy średniej wielkości oraz część mniejszych podmiotów. W praktyce oznacza to, że obowiązek raportowania zrównoważonego rozwoju obejmie znaczną część przedsiębiorstw produkcyjnych, w tym firmy z sektora chemicznego i branży żywic syntetycznych (European Commission, 2022).

Dyrektywa wprowadza również obowiązek stosowania Europejskich Standardów Raportowania Zrównoważonego Rozwoju (ESRS). Co istotne, zgodnie z CSRD, raporty ESG będą podlegały niezależnemu audytowi, co zwiększa wagę rzetelnego i wiarygodnego gromadzenia danych środowiskowych i społecznych.

Dla **producentów żywic syntetycznych** CSRD oznacza konieczność systematycznego monitorowania i raportowania takich parametrów jak:

- Zużycie surowców chemicznych oraz energii w całym cyklu produkcyjnym.
- Ilość generowanych odpadów i emisji CO₂.
- Udział materiałów z recyklingu w produkcie końcowym.
- **Stosowanie substancji niebezpiecznych** i działania zmierzające do ich ograniczenia.
- Inicjatywy związane z wdrażaniem gospodarki o obiegu zamkniętym.

Wymogi te stwarzają potrzebę wdrożenia nowoczesnych systemów pomiarowych, które umożliwiają nieprzerwane zbieranie, agregowanie i analizowanie danych procesowych w czasie rzeczywistym. Narzędzia z obszaru Quality 4.0, technologie pomiarów inline, online oraz systemy integrujące dane z różnych etapów produkcji stają się podstawą do wiarygodnego raportowania wymaganych wskaźników ESG oraz szybkiego reagowania na niezgodności procesowe.

Wprowadzenie CSRD stanowi jeden z najważniejszych kroków Unii Europejskiej w kierunku zwiększenia przejrzystości działalności przedsiębiorstw oraz podkreśla znaczenie odpowiedzialności środowiskowej i społecznej jako elementów nieodłącznych od strategii biznesowej. Dla branży chemicznej, w tym dla producentów żywic syntetycznych, rzetelne i transparentne raportowanie ESG staje się kluczowym czynnikiem budowania długoterminowej wartości, zdobywania zaufania klientów i inwestorów oraz zapewnienia zgodności z rosnącymi wymaganiami organów nadzorczych (PwC, 2023).

1.3 Waste Framework Directive

Waste Framework Directive (Dyrektywa Ramowa o Odpadach) 2008/98/WE ustanawia podstawowe zasady zarządzania odpadami w Unii Europejskiej i ma na celu **ochronę środowiska oraz zdrowia ludzkiego** poprzez właściwe gospodarowanie odpadami (European Commission, 2018).

Dyrektywa definiuje hierarchię postępowania z odpadami – największy priorytet mają działania zapobiegające powstawaniu odpadów, następnie recykling, odzysk energii, a na końcu unieszkodliwianie.

Zgodnie z Waste Framework Directive, firmy muszą wdrażać systemy monitorowania i raportowania przepływu odpadów w cyklu życia produktu. Niezgodność z wymogami dyrektywy może skutkować poważnymi sankcjami administracyjnymi oraz finansowymi.

Technologie Quality 4.0 oraz spektroskopia Ramana umożliwiają minimalizowanie odpadów już na etapie produkcji. Dane pozyskiwane w czasie rzeczywistym są niezbędne do przygotowania rzetelnych raportów wymaganych przez Waste Framework Directive.

Przykładowo, wdrożenie systemu analitycznego umożliwia szybkie wykrywanie nieprawidłowości w procesie polimeryzacji, co minimalizuje ryzyko produkcji partii niezgodnych z wymaganiami jakościowymi.

1.4 Circular Economy Action Plan

W 2020 roku Komisja Europejska przyjęła nowy Plan Działania na rzecz Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (Circular Economy Action Plan – CEAP), który jest kluczowym elementem Europejskiego Zielonego Ładu. CEAP koncentruje się na redukcji odpadów, zwiększeniu efektywności wykorzystania surowców oraz promowaniu recyklingu i ponownego użycia materiałów (European Commission, 2020a).

Plan Działania przewiduje zaostrzenie przepisów dotyczących trwałości, możliwości naprawy, ponownego wykorzystania oraz recyklingu produktów chemicznych i tworzyw sztucznych. Dla przemysłu żywic syntetycznych oznacza to rosnącą presję na projektowanie produktów zgodnych z zasadami ekoprojektowania.

Circular Economy Action Plan kładzie nacisk na cyfrowe paszporty produktów, które mają zawierać szczegółowe informacje dotyczące składu chemicznego, śladu węglowego oraz cyklu życia produktu. Technologie Quality 4.0 umożliwiają automatyczne gromadzenie danych niezbędnych do tworzenia cyfrowych paszportów produktów.

Wdrażanie CEAP w przemyśle żywic syntetycznych wymaga efektywnego monitorowania zużycia surowców oraz emisji zanieczyszczeń, co może być realizowane przy pomocy analityki procesowej bazującej na spektroskopii Ramana.

1.5 Energy Efficiency Directive

Energy Efficiency Directive (EED) to jeden z kluczowych instrumentów polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej, mający na celu ograniczenie zużycia energii i zwiększenie efektywności energetycznej. Aktualna wersja dyrektywy została zaktualizowana w 2023 roku w ramach pakietu „Fit for 55” (European Commission, 2023).

Dla producentów żywic syntetycznych EED oznacza konieczność optymalizacji procesów produkcyjnych pod kątem zużycia energii oraz wdrażania systemów zarządzania energią. Zgodnie z art. 8 dyrektywy, duże przedsiębiorstwa są zobowiązane do przeprowadzania regularnych audytów energetycznych lub wdrożenia systemów zarządzania energią zgodnych z ISO 50001.

W kontekście energochłonnych procesów polimeryzacji w wysokich temperaturach, efektywność energetyczna staje się jednym z kluczowych wskaźników konkurencyjności. Technologie Quality 4.0 umożliwiają optymalizację parametrów procesowych w czasie rzeczywistym, co przekłada się na oszczędności energii i niższe koszty produkcji.

Precyzyjne monitorowanie reakcji chemicznych przy użyciu spektroskopii Ramana pozwala na minimalizację czasu przetwarzania i zużycia energii cieplnej. Nowoczesne systemy analityczne umożliwiają ciągłe śledzenie przebiegu reakcji chemicznych, eliminując konieczność czasochłonnych analiz offline.

Unia Europejska przewiduje redukcję emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% do 2030 roku w porównaniu do poziomów z 1990 roku (European Parliament, 2022c). Dla sektora chemicznego oznacza to konieczność inwestowania w nowoczesne technologie, które zapewnią zgodność z przepisami oraz niższe koszty operacyjne.

1.6 Stabilność regulacyjna i koszty zgodności

Ostatnie analizy branżowe zwracają uwagę, że rosnące obciążenia i zmienność europejskich przepisów podważają rentowność inwestycji w sektorze chemicznym: kumulujące się wymagania środowiskowe, niepewne ceny energii i coraz większy wolumen raportowania mogą wypychać produkcję poza UE.

Przykładem jest stopniowe ograniczanie bezpłatnych uprawnień do emisji oraz rozszerzanie mechanizmów granicznych na chemikalia o wysokiej energochłonności; obowiązek wliczania „ceny węgla” w marżę podnosi koszt wytwarzania żywic i wymusza rewizję modeli ROI. Jednocześnie przedsiębiorstwa sygnalizują, że brakuje stabilnego otoczenia legislacyjnego, które pozwalałoby pewnie planować kontrakty energetyczne i finansowanie modernizacji na horyzoncie dekady.

W takiej sytuacji najtańszą polisą przeciw eskalacji kosztów zgodności staje się szybkie obniżenie intensywności zasobowej zakładu: ciągłe monitorowanie surowców i energii, automatyczne raportowanie CSRD/REACH oraz algorytmy optymalizujące parametry partii już dziś redukują koszt jednostkowy nawet o kilka procent.

Rekomendacje operacyjne

1. Śledź koszt ETS/CBAM w czasie rzeczywistym.
2. Automatyzuj strumień danych „czujnik → raport ESG”.
3. Modeluj scenariusze cen energii przed każdym CAPEX.
4. Buduj elastyczne architektury danych (OPC UA/MQTT).

Takie podejście tworzy bufor kosztowy wobec niestabilnej legislacji i wzmacnia pozycję firmy w rozmowach z inwestorami i klientami.



ROZDZIAŁ

2

KONCEPCJA QUALITY 4.0:
NOWOCZESNE ZARZĄDZANIE
JAKOŚCIĄ W PRZEMYŚLE
CHEMICZNYM

Streszczenie rozdziału:

Quality 4.0 to nowoczesne podejście do zarządzania jakością, które łączy czujniki IoT, analitykę Big Data, sztuczną inteligencję i systemy chmurowe, aby gromadzić i przetwarzać dane produkcyjne w czasie rzeczywistym. Quality 4.0 przenosi kontrolę jakości z trybu reaktywnego do trybu predykcyjnego – operatorzy mogą korygować parametry reakcji już na linii, zanim pojawi się niezgodność.

Autorzy omawiają kluczowe komponenty Quality 4.0 w zakładach chemicznych: sieć sond inline, modele uczenia maszynowego, warstwę integracji z SCADA/MES oraz moduły raportowania ESG. Wskazują, że w produkcji żywic syntetycznych rozwiązanie to umożliwia ciągły nadzór nad surowcami, reakcjami polimeryzacji i produktem gotowym, a zebrane dane trafiają bezpośrednio do systemów raportowych REACH, CSRD i Waste Framework Directive.

Analiza przytacza twarde korzyści biznesowe: wzrost efektywności operacyjnej o 15–20%, redukcję kosztów jakości do 30% oraz spadek odpadów nawet o 25% względem kontroli offline. Dodatkowo Quality 4.0 przyspiesza przygotowanie sprawozdań ESG i wzmacnia pozycję firmy w łańcuchach dostaw zorientowanych na zrównoważony rozwój.

Podsumowując, wdrożenie Quality 4.0 jest dziś koniecznością: pozwala spełniać coraz bardziej złożone wymagania regulacyjne UE i podnosić rentowność procesów wytwarzania żywic syntetycznych.

2.1 Definicja i podstawowe założenia Quality 4.0

Quality 4.0 można zdefiniować jako zintegrowany system zarządzania jakością oparty na technologiach cyfrowych, które umożliwiają gromadzenie, analizę oraz wykorzystanie danych produkcyjnych w czasie rzeczywistym (Antony et al., 2020). W odróżnieniu od tradycyjnych metod jakościowych opartych na ręcznym pobieraniu próbek i analizach laboratoryjnych offline, Quality 4.0 bazuje na automatycznych systemach pomiarowych oraz inteligentnych algorytmach przetwarzających dane na bieżąco.

Cechy charakterystyczne Quality 4.0 obejmują:

- Integrację Internetu Rzeczy (IoT) – urządzenia produkcyjne, czujniki i systemy analityczne są połączone w sieć umożliwiającą dwukierunkową komunikację i wymianę danych w czasie rzeczywistym (Schroeder et al., 2019).
- Wykorzystanie sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego (ML) – algorytmy analizują dane procesowe, identyfikują wzorce i przewidują potencjalne odchylenia od norm jakościowych (Antony et al., 2020).
- Automatyzację procesów kontrolnych – technologie takie jak spektroskopia Ramana umożliwiają pomiary inline, bez konieczności pobierania próbek do laboratorium.
- Analitykę predykcyjną – systemy wykrywają problemy jakościowe i sugerują optymalne działania korygujące.
- Zarządzanie wiedzą w chmurze – dane są przechowywane w zintegrowanych systemach chmurowych, umożliwiających dostęp do informacji z różnych lokalizacji w czasie rzeczywistym (Srinivasan & Mukherjee, 2022).

2.2 Kluczowe komponenty Quality 4.0 w przemyśle chemicznym

Internet Rzeczy (IoT) odgrywa fundamentalną rolę w Quality 4.0. W przemyśle chemicznym IoT umożliwia ciągłe monitorowanie parametrów produkcyjnych takich jak temperatura, ciśnienie, przepływy, lepkość, stężenia surowców oraz jakość wyrobu końcowego. Czujniki IoT zbierają dane z linii produkcyjnych i przesyłają je do centralnych systemów analitycznych, co pozwala na szybką reakcję na wszelkie odchylenia.

Przykładem może być zastosowanie spektrometrów Ramana podłączonych do systemów IoT, które umożliwiają natychmiastową kontrolę składu chemicznego żywic w trakcie reakcji polimeryzacji (Smith et al., 2019).

Sztuczna inteligencja i uczenie maszynowe (AI/ML) znajdują coraz szersze zastosowanie w Quality 4.0, szczególnie w analizie dużych zbiorów danych produkcyjnych. Technologie te umożliwiają automatyczne wykrywanie anomalii i odchyłeń od oczekiwanych parametrów procesowych, co wspiera szybsze podejmowanie decyzji oraz reakcję podczas trwania produkcji.

W produkcji żywic syntetycznych AI może służyć m.in. do:

- Przewidywania momentu zakończenia reakcji chemicznej.
- Optymalizacji parametrów produkcyjnych w czasie rzeczywistym.
- Wykrywania pogorszonej jakości surowców.

Big Data i zaawansowana analityka umożliwiają łączenie danych z różnych źródeł: czujników procesowych, systemów ERP, analiz laboratoryjnych oraz danych historycznych. Dzięki analityce predykcyjnej, firmy mogą przewidywać awarie urządzeń oraz optymalizować całkowity koszt jakości (Srinivasan & Mukherjee, 2022).

Systemy w chmurze (Cloud Computing) zapewniają centralizację danych produkcyjnych, automatyczną analizę oraz tworzenie wizualizacji procesów w trybie online. W obliczu rosnących wymagań Unii Europejskiej producenci żywic syntetycznych coraz częściej wdrażają systemy pomiarowe umożliwiające pomiary inline i online, wspierające raportowanie zgodne z CSRD i Waste Framework Directive.

Nowoczesne systemy pomiarowe integrują dane w czasie rzeczywistym, umożliwiając ciągłe monitorowanie składu chemicznego, zużycia surowców i parametrów środowiskowych bez konieczności pobierania próbek.

Dzięki rozwojowi platform chmurowych oraz IoT, dane z pomiarów mogą być szybko przetwarzane i udostępniane w celu zarządzania zgodnością, optymalizacji zużycia zasobów i dynamicznej kontroli produkcji. Nowoczesne systemy wspierają realizację celów zrównoważonego rozwoju oraz umożliwiają efektywne reagowanie na zmiany operacyjne i wymagania legislacyjne.

2.3 Praktyczne zastosowanie Quality 4.0 w produkcji żywic syntetycznych

Wdrożenie koncepcji Quality 4.0 w przemyśle chemicznym umożliwia istotną transformację sposobu zarządzania procesami produkcyjnymi i jakościowymi. Kluczowym elementem Quality 4.0 jest przesunięcie działań jakościowych bezpośrednio w stronę procesu produkcyjnego, co pozwala ograniczyć zależność od analiz offline i umożliwia szybsze wykrywanie i korygowanie odchyleń jeszcze w trakcie trwania produkcji. Dzięki temu możliwe staje się reagowanie w czasie rzeczywistym na zmiany parametrów procesowych, co wspiera lepszą kontrolę zużycia surowców, minimalizację odpadów i poprawę efektywności operacyjnej.

Monitorowanie surowców w czasie rzeczywistym

Jednym z największych wyzwań w produkcji żywic syntetycznych jest **kontrola jakości dostarczanych surowców**. Zmienność jakości partii może prowadzić do **defektów w wyrobach gotowych**.

Dzięki zastosowaniu spektroskopii Ramana zintegrowanej z systemami Quality 4.0 możliwe jest szybkie, nieniszczące badanie składu surowców przy ich przyjęciu. Analiza ramanowska potwierdza zgodność surowca ze specyfikacją w ciągu kilku sekund, co eliminuje ryzyko wprowadzenia nieodpowiednich materiałów do produkcji (Smith et al., 2019).

Technologie analityczne umożliwiają automatyczne rejestrowanie wyników w systemach chmurowych oraz powiązanie ich z partiami produkcyjnymi, co wspiera pełną identyfikowalność wymaganą przez regulacje REACH i Circular Economy Action Plan.

Kontrola procesów chemicznych inline

Tradycyjne metody kontroli jakości w przemyśle chemicznym są **czasochłonne i nie pozwalają na bieżące reagowanie**.

Quality 4.0 w połączeniu ze spektroskopią Ramana umożliwia kontrolę procesów chemicznych w czasie rzeczywistym bez przerywania produkcji. Spektrometry Ramana zapewniają bieżący dostęp do informacji o stężeniu monomerów, przebiegu reakcji polimeryzacji oraz powstawaniu produktów ubocznych.

Taka kontrola umożliwia dynamiczne dostosowywanie parametrów procesowych – temperatury, ciśnienia, dozowania surowców – w celu utrzymania optymalnych warunków produkcji. Dodatkowo, zautomatyzowana kontrola inline pozwala skrócić czas cyklu produkcyjnego oraz ograniczyć ilość odpadów produkcyjnych.

Automatyczne raportowanie zgodności

Quality 4.0 wspiera automatyzację raportowania zgodności z regulacjami UE, w szczególności CSRD, Waste Framework Directive oraz Energy Efficiency Directive. Dzięki centralizacji danych procesowych w systemach chmurowych, przedsiębiorstwa mogą generować raporty praktycznie w czasie rzeczywistym.

Zautomatyzowane raportowanie zmniejsza obciążenie administracyjne oraz minimalizuje ryzyko błędów ludzkich podczas przygotowywania dokumentacji dla organów nadzorczych.

2.4 Korzyści biznesowe wynikające z wdrożenia rozwiązań Quality 4.0 w produkcji żywic syntetycznych

Wdrożenie koncepcji Quality 4.0 oraz technologii spektroskopii Ramana w produkcji żywic syntetycznych przynosi szereg korzyści operacyjnych i strategicznych.

Zwiększenie efektywności operacyjnej

Dzięki bieżącemu monitorowaniu procesów i automatyzacji kontroli jakości możliwe jest skrócenie cykli produkcyjnych, zmniejszenie przestojów oraz ograniczenie strat materiałowych. Systemy Quality 4.0 pozwalają optymalizować ustawienia procesowe w czasie rzeczywistym, co przekłada się na mniejsze zużycie energii i surowców.

Wdrożenie Quality 4.0 może prowadzić do poprawy efektywności produkcji o 15-20% oraz redukcji kosztów jakości nawet o 30% (PwC, 2023).

Zmniejszenie ryzyka niezgodności i kosztów odpadów

Automatyczna kontrola jakości inline oraz szybka analiza składu surowców znacząco zmniejszają ryzyko wprowadzenia nieodpowiednich materiałów do produkcji. Szybkie wykrywanie odchyleń umożliwia korekty w trakcie procesu, co ogranicza ilość odpadów produkcyjnych i koszty ich utylizacji.

Wdrażanie spektroskopii Ramana inline może zmniejszyć ilość odpadów niezgodnych nawet o 25% w porównaniu do systemów offline (Smith et al., 2019).

Usprawnienie zgodności regulacyjnej

Quality 4.0 ułatwia spełnianie wymagań regulacyjnych UE w zakresie raportowania ESG, gospodarowania odpadami oraz efektywności energetycznej. Zintegrowane systemy zarządzania danymi umożliwiają szybkie przygotowanie raportów oraz dostarczają wiarygodnych informacji audytorom i organom nadzorczym.

Wzrost konkurencyjności i zaufania klientów

Firmy, które wdrażają nowoczesne technologie jakościowe i przejrzyste raportują działania środowiskowe, zyskują przewagę konkurencyjną. Coraz więcej klientów wymaga nie tylko wysokiej jakości produktów, ale także zgodności z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Dzięki Quality 4.0 producenci żywic syntetycznych budują silniejszą pozycję w łańcuchach dostaw opartych na zasadach ESG.

Możliwość rozwoju produktów ekologicznych

Dynamiczny monitoring procesów oraz szybkie wdrażanie zmian technologicznych umożliwiają projektowanie i produkcję bardziej ekologicznych żywic o mniejszym śladzie węglowym i lepszych parametrach użytkowych.



ROZDZIAŁ

3

PORÓWNANIE METOD
POMIARU JAKOŚCI W
PRZEMYŚLE CHEMICZNYM:
OFFLINE, ATLINE, ONLINE,
INLINE

Porównanie metod pomiaru jakości w przemyśle chemicznym: Offline, Atline, Online, Inline

Streszczenie rozdziału:

Rozdział przedstawia cztery główne strategie analizy procesowej – offline, atline, online i inline, klasyfikując je pod względem miejsca poboru próbki, czasu uzyskania wyników oraz poziomu integracji z automatyką zakładową.

- Offline – pełna kontrola laboratoryjna, lecz najwyższe opóźnienia i brak wpływu na bieżący proces.
- Atline – pomiary przy linii, szybsze niż offline, jednak wciąż wymagają ręcznego poboru.
- Online – aparatura podłączona w pętli obejściowej; wyniki w quasi-czasie rzeczywistym, lecz bez bezpośredniego sterowania reakcją.
- Inline – czujnik osadzony w procesie; natychmiastowe dane umożliwiają automatyczne korekty parametrów i minimalizują ryzyko odchyłeń jakościowych.

Kluczowym wnioskiem jest to, że tylko pomiary inline spełniają jednocześnie trzy kryteria rosnące w branży żywic syntetycznych:

- redukcję strat surowcowych
- optymalizację zużycia energii
- pełną zgodność z dynamicznie zaostrzanymi regulacjami UE

Rozdział syntetyzuje wyniki w tabeli porównawczej (Tabela 3) oraz wskazuje, w jakich scenariuszach biznesowych warto przejść z modeli offline/atline do architektury inline, aby zbudować przewagę kosztową i skrócić ścieżkę audytu ESG.

3.1 Pomiar Offline

Definicja i charakterystyka

Pomiar Offline to tradycyjna metoda, w której próbka jest pobierana z procesu, transportowana do laboratorium, a analiza wykonywana jest z dużym opóźnieniem względem momentu pobrania.

System analityczny nie jest połączony z linią produkcyjną ani z systemami automatyki. Proces produkcyjny nie czerpie bezpośrednio danych z takich pomiarów – wyniki służą głównie do potwierdzenia jakości wyrobów już po zakończeniu procesu.

Przykłady zastosowań

- Chromatografia gazowa (GC) i cieczowa (HPLC).
- Spektroskopia FTIR i UV-Vis.
- Testy mechaniczne i chemiczne w laboratoriach kontroli jakości.

Zalety

- Bardzo szeroki zakres możliwych analiz.
- Najwyższa dokładność przy specjalistycznych badaniach.

Ograniczenia

- Długi czas oczekiwania na wyniki (od kilkudziesięciu minut do kilku godzin).
- Konieczność ręcznego pobierania próbek i ich transportu.
- Wysokie ryzyko błędów wynikających z poboru próbki, nieprawidłowego przygotowania lub degradacji próbki w czasie transportu.
- Brak wpływu na proces w czasie rzeczywistym.

3.2 Pomiar Atline

Definicja i charakterystyka

Pomiar Atline polega na pobieraniu próbek bezpośrednio w sąsiedztwie linii produkcyjnej, gdzie znajdują się przenośne lub stacjonarne analizatory. Analiza wykonywana jest blisko procesu, ale system nie jest zintegrowany z automatyką sterującą – dane są zazwyczaj odczytywane i interpretowane ręcznie.

Przykłady zastosowań

- Mobilne spektrometry IR lub Ramana ustawione w pobliżu reaktorów.
- Przenośne analizatory wilgotności lub gęstości.

Zalety

- Skrócony czas analizy w porównaniu do pomiarów offline.
- Mniejsze ryzyko degradacji próbki.
- Dostęp do wyników bezpośrednio w hali produkcyjnej.

Ograniczenia

- Nadal wymaga ręcznego pobierania próbek.
- Brak bezpośredniego połączenia z systemem sterowania.
- Niska częstotliwość analiz.

3.3 Pomiar Online

Definicja i charakterystyka

Pomiar Online odnosi się do ciągłego lub półciągłego pomiaru parametrów procesowych w czasie rzeczywistym, gdzie analizator jest zainstalowany poza linią produkcyjną, a próbka pobierana jest automatycznie, często poprzez pętlę boczną (by-pass). System Online jest zintegrowany z automatyką procesową (SCADA, DCS) i pozwala na automatyczne przesyłanie danych do systemów sterowania.

Przykłady zastosowań

- Spektrometry Ramana lub NIR podłączone w by-passie.
- Analizatory pH, przewodności i lepkości w pętlach próbkujących.
- Przepływowe analizatory składu chemicznego.

Zalety

- Dane dostępne w czasie rzeczywistym.
- System połączony z systemem sterowania (automatyczna archiwizacja i alarmowanie).
- Częste lub ciągłe pomiary bez udziału operatora.

Ograniczenia

- Konieczność stosowania pętli bocznych i próbkowania automatycznego.
- Ryzyko, że próbka w by-passie nie będzie w pełni reprezentatywna dla całego strumienia produkcyjnego.

- Opóźnienie między pobraniem próbki a uzyskaniem wyniku

3.4 Pomiar Inline

Definicja i charakterystyka

Pomiar Inline oznacza bezpośrednią integrację urządzenia pomiarowego z linią produkcyjną, rurociągiem lub reaktorem, bez potrzeby pobierania próbki. Sensor lub sonda pomiarowa znajduje się w samym procesie i dokonuje pomiaru w czasie rzeczywistym. Dane są automatycznie przekazywane do systemu sterowania.

Przykłady zastosowań

- Spektroskopia Ramana z sondą zanurzeniową w reaktorze.
- Przepływowe czujniki temperatury, ciśnienia, przewodności z bezpośrednim odczytem z rurociągu.
- Systemy kontroli gęstości i lepkości z czujnikiem w linii.

Zalety

- Natychmiastowy dostęp do danych – brak opóźnienia.
- Brak potrzeby pobierania próbek – eliminacja błędów ludzkich.
- Pełna automatyzacja – dane mogą bezpośrednio sterować procesem.
- Bardzo wysoka częstotliwość pomiarów – pomiar w trybie ciągłym.

Ograniczenia

- Wysoki koszt inwestycyjny.
- Konieczność stosowania odpornych sond przemysłowych.
- Wymaga specjalistycznej kalibracji i walidacji w miejscu pracy.

3.5 Tabela porównawcza metod pomiarowych

Kryterium	Offline	Atline	Online	Inline
Lokalizacja	Laboratorium	Obok linii produkcyjnej	W by-passie	W linii produkcyjnej
Pobór próbki	Ręczny	Ręczny	Automatyczny	Brak – pomiar bezpośredni
Czas uzyskania wyniku	Minuty – godziny	Kilka – kilkanaście minut	Sekundy – minuty	Sekundy – real time
Kontrola jednorodności	Brak	Brak	Brak	Tak, można wykorzystać kilka sond
Integracja z automatyką	Brak	Brak	Pełna	Pełna
Ryzyko błędów ludzkich	Wysokie	Średnie	Niskie	Bardzo niskie
Częstotliwość pomiarów	Niska	Średnia	Wysoka	Bardzo wysoka
Automatyzacja	Brak	Ograniczona	Pełna	Pełna
Wspieranie regulacji UE	Ograniczone	Średnie	Wysokie	Bardzo wysokie

Koszt inwestycyjny	Niski	Średni	Wysoki	Wysoki
--------------------	-------	--------	--------	--------

Tabela 3: Porównanie metod pomiarowych
Źródło: Opracowanie własne na podstawie materiałów Gekko Photonics

3.6 Znaczenie pomiarów Inline i Online dla zgodności z regulacjami UE

Metody Inline i Online oferują największe wsparcie dla przedsiębiorstw chemicznych w zakresie wymagań regulacyjnych UE oraz strategii zrównoważonego rozwoju. Ich zdolność do dostarczania bieżących, wiarygodnych danych procesowych jest kluczowa dla spełnienia obowiązków w ramach:

- REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals): umożliwiają bieżącą kontrolę składu chemicznego, pełną identyfikowalność surowców i produktów oraz dokumentowanie zgodności procesowej.
- CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive): wspierają automatyczne zbieranie danych niezbędnych do raportowania ESG, w tym zużycia energii, materiałów, ilości odpadów oraz emisji procesowych.
- Waste Framework Directive i Circular Economy Action Plan: umożliwiają minimalizację strat procesowych i odpadów dzięki szybkiemu wykrywaniu odchyleń, wspierają identyfikację materiałów wtórnych oraz efektywne zarządzanie zasobami.
- Energy Efficiency Directive: pozwalają na dynamiczną kontrolę zużycia energii i optymalizację czasu trwania procesów, co bezpośrednio wpływa na poprawę wskaźników efektywności energetycznej wymaganych przez dyrektywę EED.



ROZDZIAŁ

4

SPEKTROSKOPIA RAMANA
- KLUCZOWA
TECHNOLOGIA W
KONTROLI PRODUKCJI
ŻYWIC SYNTETYCZNYCH

Spektroskopia Ramana - kluczowa technologia w kontroli produkcji żywic syntetycznych

Streszczenie rozdziału:

Spektroskopia Ramana to szybka, nieniszcząca metoda identyfikacji składu chemicznego, która – dzięki możliwości pracy inline – staje się fundamentem nowoczesnego nadzoru procesów polimeryzacji żywic. Ciągły pomiar widma w reaktorze pozwala operatorom natychmiast ustalić moment zakończenia reakcji, skracając czas cyklu i zmniejszając zużycie energii.

Autorzy wyróżniają cztery przewagi technologii: natychmiastowy dostęp do wyników, wysoką specyficzność chemiczną, pełną integrację z linią produkcyjną oraz modułową skalowalność punktów pomiarowych. Te cechy przekładają się na **redukcję odpadów, lepszą identyfikowalność partii i obniżenie kosztów jakości**. Dzięki wbudowanym algorytmom uczenia maszynowego system stale udoskonala interpretację widm, co dodatkowo zwiększa dokładność kontroli.

Pomiary Ramana wspierają jednocześnie wszystkie główne regulacje UE:

- **REACH**: bieżąca kontrola składu
- **CSRD**: automatyzacja zbierania danych ESG
- **WFD, CEAP**: minimalizacja odpadów
- **EED**: optymalizacja zużycia energii

Wdrożenie spektroskopii Ramana to nie tylko krok w stronę zgodności regulacyjnej, lecz także realny sposób na zwiększenie marży dzięki mniejszym kosztom surowcowym i energetycznym.

4.1 Zasada działania spektroskopii Ramana

Spektroskopia Ramana opiera się na zjawisku rozpraszania nieelastycznego światła, znanego jako efekt Ramana. Gdy wiązka światła laserowego pada na badaną substancję, większość fotonów ulega sprężystemu rozproszeniu Rayleigha, nie zmieniając swojej energii. Jednak niewielki odsetek fotonów (około 1 na milion) oddziałuje z cząsteczkami substancji w sposób nieelastyczny – to właśnie rozproszenie Ramana (Long, 2002).

Charakterystyczne przesunięcia energetyczne w widmie Ramana są bezpośrednio związane ze strukturą molekularną substancji, co pozwala na ich jednoznaczną identyfikację. Widmo Ramana pełni funkcję chemicznego „odcisku palca”, umożliwiając zarówno analizę jakościową, jak i ilościową badanych materiałów (Smith et al., 2019).

Najważniejsze zalety spektroskopii Ramana:

- Brak konieczności przygotowania próbki – pomiary mogą być wykonywane bezpośrednio na ciele stałym, cieczy lub gazie.
- Możliwość analizy przez przezroczyste opakowania, co wspiera zastosowania inline.
- Krótki czas analizy – wyniki dostępne w ciągu kilku sekund.
- Wysoka specyficzność – zdolność do rozróżniania chemicznie podobnych substancji.

4.2 Zastosowanie spektroskopii Ramana w produkcji żywic syntetycznych

Spektroskopia Ramana znajduje zastosowanie na każdym etapie produkcji żywic syntetycznych – od kontroli surowców, przez monitorowanie procesów polimeryzacji, po weryfikację parametrów produktu końcowego oraz ocenę materiałów wtórnych pochodzących z recyklingu.

Kontrola jakości surowców

W produkcji żywic syntetycznych jakość surowców ma kluczowe znaczenie dla stabilności procesu i właściwości produktu finalnego. Spektroskopia Ramana umożliwia:

- Szybką identyfikację chemiczną dostarczanych surowców.
- Weryfikację czystości materiałów.
- Wykrywanie zanieczyszczeń i substancji niepożądanych.

Dzięki możliwości analizy przez przezroczyste opakowania, kontrola surowców może być realizowana bez otwierania pojemników, co przyspiesza procesy przyjęcia materiałów i ogranicza ryzyko kontaminacji.

Monitorowanie procesów polimeryzacji

Procesy polimeryzacji wymagają ścisłej kontroli stężenia reagentów, czasu reakcji oraz temperatury. Spektroskopia Ramana umożliwia:

- Ciągłe monitorowanie stężenia monomerów i reagentów w czasie rzeczywistym.
- Śledzenie szybkości reakcji i wykrywanie niepożądanych produktów ubocznych.
- Precyzyjne zakończenie procesu w optymalnym momencie.

Monitorowanie inline pozwala na oszczędność energii, redukcję strat surowców oraz minimalizację odpadów technologicznych. Badania Smith et al. (2019) wskazują, że zastosowanie spektroskopii Ramana w produkcji żywic epoksydowych skróciło czas reakcji o 10% bez pogorszenia jakości produktu.

Kontrola jakości produktu gotowego

Spektroskopia Ramana umożliwia:

- Szybką ocenę stopnia usieciowania
- Weryfikację zawartości resztkowych monomerów.
- Detekcję niepożądanych domieszek i produktów ubocznych.

Analiza inline pozwala na szybsze podejmowanie decyzji o dopuszczeniu partii do wysyłki, co skraca cykl produkcyjny i zwiększa efektywność operacyjną. Technologia ta wspiera pełną identyfikowalność partii produkcyjnych, co jest kluczowe dla zgodności z REACH oraz Circular Economy Action Plan.

Recykling i kontrola materiałów wtórnych

Spektroskopia Ramana umożliwia:

- Szybką identyfikację rodzaju odzyskiwanych żywic
- Weryfikację ich czystości i składu chemicznego.
- Detekcję zanieczyszczeń ograniczających możliwość dalszego wykorzystania materiałów.

Technologia ta wspiera realizację celów Circular Economy Action Plan, umożliwiając efektywne sortowanie materiałów i podnoszenie jakości produktów z surowców wtórnych.

4.3 Kluczowe zalety spektroskopii Ramana w kontekście produkcji żywic syntetycznych

Szybkość i natychmiastowy dostęp do wyników

Spektroskopia Ramana zapewnia operatorom dostęp do wyników w czasie rzeczywistym, co pozwala na:

- Dynamiczne sterowanie procesami
- Ograniczenie przestojów produkcyjnych
- Skrócenie całkowitego czasu produkcji

Nieniszczący charakter analizy

Technika nie wymaga pobierania próbek ani ich przygotowywania. Analizy mogą być przeprowadzane bezpośrednio w strumieniu produkcyjnym, przez przezroczyste ścianki zbiorników lub opakowania, co:

- Poprawia bezpieczeństwo pracy
- Ogranicza ryzyko zanieczyszczenia materiału
- Wspiera automatyzację kontroli

Wysoka specyficzność i czułość

Spektroskopia Ramana umożliwia wykrywanie drobnych różnic w strukturze chemicznej oraz niskiego poziomu zanieczyszczeń, co pozwala na:

- Wczesne wykrywanie niezgodności
- Precyzyjne monitorowanie przebiegu procesów
- Minimalizację ryzyka produkcji partii niezgodnych ze specyfikacją

Możliwość zastosowania inline

Systemy spektroskopii Ramana mogą być zintegrowane bezpośrednio z linią produkcyjną, co umożliwia:

- Prowadzenie pomiarów w czasie rzeczywistym
- Automatyczne sterowanie parametrami procesowymi
- Zdalne monitorowanie i archiwizację danych w ramach nowoczesnych systemów Quality 4.0

4.4 Wsparcie zgodności z regulacjami UE

REACH — pełna identyfikowalność partii i skład on-line

Produkcja żywic syntetycznych wymaga nieprzerwanej kontroli składu chemicznego. Wstawiona bezpośrednio do reaktora sonda Ramana (785 nm, rozdzielczość ok. 4 cm⁻¹) rejestruje widmo co kilkanaście sekund, tworząc unikalny „odcisk palca” dla każdej partii. Widma są automatycznie sygnowane numerem wsadu i znacznikiem czasu i zapisywane w systemie MES przez interfejs OPC UA. Umożliwia to audytorowi śledzenie całej ścieżki produkcyjnej bez sięgania po papierową dokumentację.

Gdy algorytm chemometryczny wychwyci odchylenie składu powyżej 0,5% konwersji, sterownik natychmiast koryguje dawkę katalizatora, zapobiegając powstaniu partii niezgodnej z załącznikami VI – VII rozporządzenia REACH.

CSRD i szeroko pojęte ESG

Dane Ramana płyną nieprzerwanie do platformy Quality 4.0, która łączy je z pomiarem energii, wody i odpadów, tworząc cyfrowy zestaw wskaźników ESG:

- E (Environment): intensywność energetyczna i materiałowa liczona na tonę żywicy; w pilotażu redukcja energii wyniosła ~4%.
- S (Social): brak ręcznego poboru próbek ograniczył ekspozycję załogi na chemikalia i obniżył liczbę incydentów BHP o jedną trzecią.
- G (Governance): wszystkie logi eksportowane są do szablonów CSRD jednym kliknięciem, skracając czas sporządzenia sprawozdania o około 30%.

Audytor otrzymuje ustandaryzowany plik danych z kompletnego okresu raportowego, co zwiększa wiarygodność raportu i redukuje koszt jego weryfikacji.

Dyrektywa odpadowa i gospodarka o obiegu zamkniętym

Spektroskopia Ramana:

- Klasyfikuje surowce z recyklingu (np. frakcje WEEE-plastików), eliminując zanieczyszczone partie.
- Monitoruje degradację łańcuchów PP/PE w czasie rzeczywistym, co pozwala zamknąć pętlę materiałową i spełnić kryteria „end-of-waste”.

Ciągłe potwierdzanie jakości recyklatu ułatwia uzyskanie certyfikatu zawartości recyklatu wymaganego w Circular Economy Action Plan.

Dyrektywa w sprawie efektywności energetycznej (EED)

Algorytm kontroli końca reakcji, oparty na zmianie pasm widmowych, wyłącza grzanie reaktora w momencie pełnej konwersji.

- Skraca czas partii o 10–12%
- Oszczędność 3–5 kWh energii na tonę żywicy
- Redukcja zużycia HVAC i energii pomocniczej

Dla zakładu o wydajności 50 000 t/rok to:

- Ponad 1,5 GWh energii rocznie
- Redukcja emisji o przeszło 600 t CO₂ rocznie

Parametry te mogą być bezpośrednio wykazane w audycie EED.



ROZDZIAŁ

5

TECHNOLOGIA SPECTRALLY:
PRZEWAGA OPERACYJNA I
ZGODNOŚĆ REGULACYJNA

Streszczenie rozdziału:

Spectrally to platforma pomiarowa klasy inline zaprojektowana specjalnie dla procesów polimeryzacji żywic syntetycznych. Jej rdzeń stanowi spektroskopia Raman o precyzji $\pm 0,1\%$, zintegrowana z algorytmami uczenia maszynowego, które w czasie rzeczywistym dopasowują modele do zmiennych warunków procesu. Dzięki temu system dostarcza dokładne wyniki w ciągu kilku sekund i umożliwia automatyczne korygowanie parametrów reakcji bez przerywania produkcji.

Rozdział pokazuje cztery kluczowe atuty rozwiązania:

- Pełną integrację z linią produkcyjną
- Modularną skalowalność punktów pomiarowych
- Samodoskonalące się modele ML
- Wbudowany moduł raportowania ESG, który eksportuje dane prosto do szablonów CSRD, redukując koszty administracyjne i skracając czas przygotowania dokumentacji nawet o 30%

Autorzy zestawiają Spectrally z tradycyjnymi metodami offline i klasycznymi systemami inline, podkreślając, że tylko oferowane rozwiązanie łączy sekundowy czas odpowiedzi, pełną automatyzację i kompatybilność z Quality 4.0. W efekcie zakłady zyskują:

- Niższe zużycie surowców
- Mniejszą energochłonność
- Szybsze spełnienie wymogów REACH, CSRD oraz Waste Framework Directive

Rozdział konkluduje, że implementacja Spectrally to sprawdzony sposób na jednoczesne zwiększenie marży i ograniczenie ryzyk regulacyjnych – technologia staje się strategicznym elementem cyfrowej transformacji produkcji żywic.

5.1 Opis technologii Spectrally

Spectrally to modułowy system spektroskopii Ramana online i inline, który umożliwia monitorowanie składu chemicznego w czasie rzeczywistym w różnych punktach procesu produkcyjnego. System jest przystosowany do pracy w środowiskach przemysłowych, zarówno w rurociągach, reaktorach, jak i zbiornikach magazynowych.

Kluczowe elementy systemu Spectrally:

- Wysokorozdzielczy spektrometr Ramana zaprojektowany do pracy w trybie ciągłym.
- Przemysłowe sondy pomiarowe odporne na wysoką temperaturę, ciśnienie oraz agresywne chemikalia.
- Moduł oprogramowania chmurowego integrujący dane pomiarowe z QMS, SCADA oraz ERP.
- Zaawansowane algorytmy AI i Machine Learning, umożliwiające analizę widm Ramana w czasie rzeczywistym oraz generowanie rekomendacji operacyjnych.

System wspiera zdalne monitorowanie i diagnostykę, umożliwiając dostęp do danych z poziomu komputerów, urządzeń mobilnych oraz platform chmurowych.

5.2 Główne zalety systemu Spectrally

Pełna zgodność z Quality 4.0

- Integracja z IoT, analityką Big Data oraz systemami sterowania produkcją.
- Bezpośrednie sterowanie parametrami produkcyjnymi na podstawie wyników analiz Ramana.
- Generowanie alarmów i rekomendacji w przypadku wykrycia odchyleń jakościowych.
- Automatyczne raportowanie zgodności z REACH, CSRD i innymi dyrektywami UE.

Wysoka precyzja i szybkość pomiarów

- Wyniki analizy dostępne w ciągu sekund
- Możliwość pracy w trybie ciągłym bez przerywania procesu.
- Szybkie wykrywanie momentu zakończenia reakcji chemicznej.

Modularność i skalowalność

- Elastyczna liczba punktów pomiarowych.
- Indywidualnie dopasowywane sondy do monitorowanych parametrów.
- Skalowalność od pojedynczej linii produkcyjnej do całych zakładów chemicznych.
- Wspiera pomiary offline, atline, online i inline w jednym systemie.

5.3 Przewagi konkurencyjne systemu Spectrally

Technologia Spectrally od Gekko Photonics wyróżnia się na tle tradycyjnych i konkurencyjnych rozwiązań dzięki przewagom technicznym, które skracają czas cyklu produkcyjnego, obniżają zużycie energii oraz zmniejszają udział odpadów. Poniżej przedstawiono główne atuty technologii, które przekładają się na mierzalne korzyści dla producentów żywic syntetycznych.

Bezpośrednia integracja z linią produkcyjną

Spectrally jest w pełni przystosowany do pracy inline w warunkach przemysłowych, bez pobierania próbek.

System jest odporny na wysokie temperatury, ciśnienia oraz środki chemiczne, umożliwiając montaż bezpośrednio w rurociągach produkcyjnych.

Korzyści:

- Brak potrzeby zatrzymywania produkcji w celu wykonania pomiarów.
- Bieżące sterowanie procesem na podstawie wiarygodnych, natychmiastowych danych.
- Możliwość monitorowania wielu punktów procesu jednocześnie.

Algorytmy samouczące (Machine Learning)

Spectrally wykorzystuje zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego (ML), które automatycznie dostosowują się do zmieniających się warunków procesowych.

Korzyści:

- System stale podnosi swoją dokładność analityczną.
- Możliwość wykrywania nieoczywistych trendów i anomalii w procesie.
- Redukcja potrzeby ręcznego kalibrowania urządzeń pomiarowych.

Gotowość do raportowania ESG

Spectrally posiada moduł raportowania ESG zintegrowany z platformami chmurowymi, umożliwiający automatyczne generowanie raportów środowiskowych, jakościowych i produkcyjnych zgodnych z CSRD.

Korzyści:

- Szybkie przygotowanie dokumentacji dla audytorów i organów nadzorczych.
- Pełna identyfikowalność partii produkcyjnych i surowców.
- Zmniejszenie kosztów i czasu przygotowania raportów.

Elastyczność wdrożeniowa

Spectrally można indywidualnie konfigurować pod konkretne procesy produkcyjne.

System jest kompatybilny z SCADA, ERP i Quality Management Systems (QMS).

Korzyści:

- Wysoka kompatybilność z obecnymi technologiami automatyki.
- Brak konieczności kosztownych modernizacji infrastruktury.
- Możliwość etapowego wdrażania (np. od jednej linii produkcyjnej do całego zakładu).

5.4 Porównanie Spectrally z tradycyjnymi metodami analitycznymi

Poniższa tabela (Tabela 4) przedstawia porównanie systemu Spectrally z tradycyjnymi metodami analitycznymi stosowanymi w produkcji żywic syntetycznych.

Kryterium	Tradycyjne metody offline	Klasyczne systemy inline	Spectrally
Czas uzyskania wyniku	30 min – kilka godzin	Kilka minut	Kilka sekund

Tryb pracy	Próbki pobierane ręcznie	Częściowa automatyzacja	Pełna automatyzacja, inline
Integracja Quality 4.0	Brak	Ograniczona	Pełna integracja
Wymogi kadrowe	Wysokie (wymagani są analitycy laboratoryjni)	Średnie	Niskie (system autonomiczny, nie wymaga specjalistów do analizy danych)
Kompatybilność z ERP	Niska	Ograniczona	Wysoka

Tabela 4: Porównanie analizatora Spectrally z metodami offline i klasycznymi systemami inline

Źródło: Opracowanie własne na podstawie materiałów Gekko Photonics i literatury branżowej (Smith et al., 2019; PwC, 2023; Antony et al., 2020).

5.5 Wsparcie dla realizacji celów zrównoważonego rozwoju

Spectrally to narzędzie, które aktywnie wspiera przedsiębiorstwa chemiczne w realizacji celów zrównoważonego rozwoju (SDGs), szczególnie w obszarach:

- **SDG 9:** Innowacyjność, przemysł, infrastruktura – Wdrożenie zaawansowanych technologii spektroskopowych i systemów Quality 4.0.
- **SDG 12:** Zapewnienie wzorców zrównoważonej konsumpcji i produkcji:
 - Minimalizacja odpadów.
 - Optymalizacja zużycia surowców.
 - Precyzyjna kontrola jakości.
- **SDG 13:** Działania w dziedzinie klimatu
 - Poprawa efektywności energetycznej procesów.
 - Redukcja emisji gazów cieplarnianych dzięki skróceniu cykli produkcyjnych i ograniczeniu błędów produkcyjnych.

Technologia Spectrally wspiera również strategię UE dotyczącą gospodarki o obiegu zamkniętym, umożliwiając identyfikację i kontrolowanie materiałów wtórnych w procesach recyklingu.

ROZDZIAŁ

6

CASE STUDY: WDROŻENIE
ANALIZATORA
SPECTRALLY INLINE W
PRODUKCJI ŻYWIC
SYNTETYCZNYCH

Case study: Wdrożenie analizatora Spectrally inline w produkcji żywic syntetycznych

6.1 Profil zakładu produkcyjnego

Zakład produkcyjny specjalizuje się w wytwarzaniu żywic. Jest to nowoczesny obiekt przemysłowy o wysokim stopniu automatyzacji, wyposażony w wielkogabarytowe reaktory chemiczne oraz rozbudowaną infrastrukturę przesyłową surowców i produktów. Skala produkcji w zakładzie obejmuje serie wielkotonażowe. Ze względu na złożoność procesów chemicznych, kluczowe znaczenie ma zapewnienie wysokiej powtarzalności jakości, minimalizacja odpadów oraz precyzyjna kontrola parametrów procesowych.

Zakład zatrudnia specjalistów z obszaru technologii chemicznej, jakości, automatyki oraz utrzymania ruchu. W strukturze organizacyjnej funkcjonują niezależne laboratoria kontroli jakości, dział produkcji, dział inżynierii procesowej oraz dział raportowania ESG, odpowiedzialny za zgodność środowiskową.

6.2 Zakres wdrożenia systemu Spectrally

Wdrożenie systemu Spectrally objęło cztery główne linie produkcyjne w zakładzie, zlokalizowane w różnych sekcjach produkcyjnych. System został zainstalowany w sześciu krytycznych punktach pomiarowych, obejmujących zarówno reaktory polimeryzacyjne, jak i rurociągi transportujące półprodukty oraz mieszalniki finalne.

Zakres wdrożenia obejmował:

- Instalację Spectrally inline bezpośrednio w liniach produkcyjnych.
- Integrację Spectrally z istniejącymi systemami SCADA
- Wdrożenie algorytmów analitycznych do automatycznej interpretacji widm Ramana.
- Konfigurację systemu alertowego informującego operatorów o odchyleniach w czasie rzeczywistym.
- Na życzenie dyrektora ds. produkcji - uruchomienie zdalnego dostępu do danych analitycznych dla działu zarządzania oraz zespołu ds. zgodności regulacyjnej.

6.3 Wyzwania produkcyjne przed wdrożeniem Spectrally

Przed wdrożeniem Spectrally przedsiębiorstwo borykało się z wieloma ograniczeniami technologicznymi, organizacyjnymi i jakościowymi. Najpoważniejszym problemem był brak ciągłego monitoringu reakcji chemicznych in situ, co skutkowało opóźnieniami w detekcji odchyłen procesowych. Kontrola jakości była oparta na ręcznych analizach laboratoryjnych, co generowało czasochłonność, przeciążenie personelu oraz wysokie ryzyko błędów ludzkich.

Dodatkowo firma zmagала się z:

- Brakiem możliwości precyzyjnego określenia optymalnego momentu zakończenia reakcji polimeryzacyjnej.
- Różnym wynikiem reakcji polimeryzacyjnej i zakładali m.in. różną jakość substratów, zmienne warunki produkcji (ciśnienie, temperatura)
- Brakiem możliwości precyzyjnego określenia jakości substratów/surowców
- Rosnącymi kosztami energii i surowców
- Przeciążeniem laboratoriów, które nie były w stanie efektywnie wspierać projektów rozwojowych (R&D).
- Brakiem dostępu kadry zarządzającej do bieżących danych produkcyjnych.
- Opóźnieniami w reakcji na odchylenia procesowe, prowadzącymi do powstawania odpadów i konieczności utylizacji lub dodatkowych procesów produkcyjnych generując koszty.

6.4 Proces implementacji systemu Spectrally

Etap 1: Studium wykonalności

Czas trwania: 5 tygodni

- Ocena możliwości zastosowania spektroskopii Ramana dla kluczowych parametrów wskazanych przez zakład.
- Weryfikacja przydatności technologii dla analizowanych substancji.

Etap 2: Identyfikacja procesu i punktów kontrolnych

Czas trwania: 2 tygodnie

- Analiza procesów produkcyjnych i kontroli jakości.
- Wybór sześciu punktów pomiarowych na czterech liniach produkcyjnych.

Etap 3: Rekomendacje wdrożeniowe

Czas trwania: 2 tygodnie

- Opracowanie szczegółowego planu wdrożenia.
- Określenie miejsc instalacji, substancji do monitorowania, zakresu integracji.

Etap 4: Prace technologiczne i dostosowanie systemu

Czas trwania: 7 tygodni

- Konfiguracja algorytmów, kalibracja, dostosowanie urządzeń do warunków procesowych.
- Przygotowanie integracji z SCADA

Etap 5: Wdrożenie na produkcji i szkolenia

Czas trwania: 8 tygodni

- Instalacja systemu, testy walidacyjne, kalibracja w warunkach produkcyjnych.
- Szkolenia dla personelu produkcyjnego, laboratoryjnego, jakości i utrzymania ruchu.

Etap 6: Wsparcie powdrożeniowe

Czas trwania: ciągle

- Bieżące wsparcie techniczne, aktualizacje algorytmów, cykliczne kalibracje.
- System przygotowany do rozbudowy o nowe punkty pomiarowe i dodatkowe linie produkcyjne.
- Stała współpraca technologiczna i organizacyjna z partnerem.

6.5 Wyniki wdrożenia i uzyskane korzyści

Wdrożenie Spectrally przyniosło wymierne efekty technologiczne, jakościowe oraz finansowe. Dzięki ciągłemu monitorowaniu procesów w czasie rzeczywistym zakład osiągnął 18% wzrost OEE w pierwszych 6 miesiącach produkcji.

Efektywność operacyjna:

- **32% skrócenia czasu cyklu (z 2,5h do 1,7h)** – szybsze dojście do parametrów docelowych ograniczyło przestoje i zwiększyło przepustowość linii.
- **Pomiar co 2 minuty** zamiast pojedynczej próbki na koniec wsadu zapewnił bieżącą kontrolę reakcji i eliminuje decyzje „po fakcie”.
- **Redukcja błędów ludzkich** dzięki automatycznym alarmom i jasnym komunikatom dla operatorów.

Oszczędności kosztowe:

- **8% mniej energii** procesowej dzięki zatrzymaniu reakcji w punkcie optymalnym.
- **12% niższe zużycie substratów** – ciągła kontrola stężenia ograniczyła nadmiarowe dawki reagenta.
- **Obniżenie kosztów pracy laboratoriów** – rutynowe analizy zastąpione pomiarem inline uwolniły czas specjalistów na zadania rozwojowe.

Jakość produktu:

- **37% mniej reklamacji jakościowych** dzięki stabilnym parametrom i lepszej powtarzalności partii.
- **22% mniej niezgodności produktów**

Wpływ na zrównoważony rozwój:

- **Mniej odpadów technologicznych** – ograniczenie substratów i energii przełożyło się na niższe koszty utylizacji oraz mniejszy ślad węglowy.
- **Utrzymanie dokładnej dawki surowców** wspiera zgodność z coraz ostrzejszymi normami środowiskowymi dla branży chemicznej.

Głos interesariuszy:

- Zarząd podkreśla osiągnięcie wyższej marży i przewagę konkurencyjną, „mamy coś, czego nie mają inni”.

- **Kadra produkcyjna docenia uproszczenie pracy i natychmiastowe alarmy,** które „pozwalają reagować, zanim problem urośnie” (wniosek z wewnętrznych warsztatów wdrożeniowych).
- **Dział jakości wskazuje na mniejsze ryzyko niezgodności** oraz odciążenie laboratoriów, co zwiększyło potencjał badawczo-rozwojowy.

Skalowalność i kolejne kroki:

Architektura Spectrally (gotowe API do SCADA/MES) umożliwia szybkie rozszerzenie:

- na kolejne reaktory lub linie polimeryzacji,
- na procesy pokrewne, np. „batch-to-batch tracking” w produkcji żywic specjalistycznych.

Z perspektywy zarządu wdrożenie Spectrally umożliwiło bieżący dostęp do danych operacyjnych, kosztowych i jakościowych, wspierając podejmowanie decyzji strategicznych na poziomie całej organizacji.

6.6 Wpływ wdrożenia na zgodność z regulacjami UE i raportowanie ESG

Dzięki wdrożeniu Spectrally zakład produkcyjny uzyskał większą zgodność z wymaganiami Unii Europejskiej dotyczącymi identyfikowalności i raportowania. System wspiera automatyzację dokumentacji procesowej wymaganej przez organy nadzoru, co znacząco redukuje koszty administracyjne związane z przygotowywaniem raportów środowiskowych. Dodatkowo, wdrożenie Spectrally przyczyniło się do wzrostu przejrzystości procesów w łańcuchu wartości, co pozytywnie wpłynęło na pozycję firmy wśród partnerów handlowych wrażliwych na kwestie ESG.

ROZDZIAŁ

7

WYTYCZNE
WDROŻENIOWE: JAK
SKUTECZNIE
ZAIMPLEMENTOWAĆ
ANALIZATOR SPECTRALLY
W PRODUKCJI ŻYWIC
SYNTETYCZNYCH

Wytyczne wdrożeniowe: Jak skutecznie zaimplementować analizator Spectrally w produkcji żywic syntetycznych

Streszczenie rozdziału:

Rozdział przekłada teorię na praktyczną, siedmioetapową mapę wdrożenia systemu Spectrally w zakładzie chemicznym. Autorzy prowadzą czytelnika od studium wykonalności, przez identyfikację kluczowych etapów procesu i rekomendacje techniczne, po instalację, kalibrację oraz długofalowe wsparcie powdrożeniowe.

Centralnym motywem wdrożenia jest zasada „plan-test-kalibracja”: każde kolejne stadium bazuje na danych z rzeczywistych warunków produkcji, co minimalizuje ryzyko błędnej konfiguracji i zapewnia szybką akceptację operatorów. Rozdział podkreśla cztery krytyczne czynniki sukcesu — współpracę interdyscyplinarną, zarządzanie zmianą, wiarygodność danych oraz realistyczny zakres projektu—i zestawia je z trzema najczęstszymi błędami (wdrożenie tylko w jednym punkcie, brak zaangażowania personelu, zbyt krótka faza kalibracji).

Kluczowy wniosek: modułowe, etapowe wdrażanie pozwala szybko wygenerować pierwsze oszczędności i jednocześnie stworzyć fundament pod dalszą rozbudowę systemu inline. Dzięki temu przedsiębiorstwo może skalować liczbę punktów pomiarowych bez zatrzymywania produkcji, utrzymując ciągłą zgodność z regulacjami UE i wzmacniając efektywność operacyjną.

Aby w pełni wykorzystać potencjał technologii Spectrally oraz koncepcji Quality 4.0 w produkcji żywic syntetycznych, konieczne jest odpowiednie zaplanowanie oraz przeprowadzenie procesu wdrożeniowego. Poniżej przedstawiono szczegółowe wytyczne dotyczące skutecznej implementacji.

7.1 Etapy wdrożenia technologii Spectrally

Proces wdrożenia technologii Spectrally w zakładzie produkcyjnym obejmuje kilka precyzyjnie zaplanowanych etapów, które pozwalają na dostosowanie systemu pomiarowego do specyfiki danego procesu oraz rzeczywistych potrzeb partnera przemysłowego. Każdy etap ma na celu zapewnienie wysokiej wartości użytkowej wdrożenia oraz optymalizację korzyści biznesowych.

Etap 1: Studium wykonalności

Pierwszym krokiem we wdrażaniu jest przeprowadzenie studium wykonalności. Na tym etapie analizowane są próbki dostarczone przez partnera, a specjaliści dokonują weryfikacji, czy możliwe jest skuteczne przeprowadzenie analiz związków chemicznych, które są dla partnera kluczowe. Oceniane są także możliwości rozbudowy zakresu analiz o dodatkowe substancje, jeśli taka potrzeba zostanie zgłoszona. Studium wykonalności pozwala również na szczegółowe zdefiniowanie oczekiwań partnera wobec systemu oraz zakresu danych, które mają być monitorowane.

Etap 2: Identyfikacja procesu produkcyjnego i kontroli jakości

Na kolejnym etapie następuje szczegółowa analiza procesu produkcyjnego oraz obecnych procedur kontroli jakości. Wspólnie z partnerem ustalane są te obszary w zakładzie, w których technologia Spectrally może przynieść największą wartość. Analiza uwzględnia zarówno możliwości techniczne, jak i faktyczne potrzeby procesowe, co pozwala precyzyjnie określić potencjalne punkty pomiarowe.

Etap 3: Opracowanie rekomendacji wdrożeniowych

Na podstawie zebranych danych oraz analizy procesu przygotowywane są szczegółowe rekomendacje dotyczące wdrożenia systemu. Określane są proponowane miejsca instalacji w zakładzie, typy substancji do monitorowania oraz techniczne i organizacyjne uwarunkowania realizacji projektu. Oceniane są również spodziewane korzyści dla partnera w zakresie efektywności, ograniczenia strat i lepszej kontroli procesowej.

Etap 4: Przygotowanie planu wdrożenia

Na tym etapie, w zależności od potrzeb partnera, możliwe jest wspólne opracowanie szczegółowego planu wdrożenia technologii wraz z określeniem korzyści biznesowych. Partnerzy mogą wspólnie przeanalizować harmonogram, zakres dostosowania infrastruktury oraz sposób włączenia nowego systemu w istniejącą strukturę produkcyjną i raportową.

Etap 5: Prace technologiczne i dostosowanie systemu

Następnie prowadzone są prace technologiczne, które obejmują dostosowanie algorytmów analitycznych i konfigurację analizatora Spectrally do specyfiki procesu produkcyjnego partnera. System jest przygotowywany tak, aby odpowiadał na konkretne potrzeby procesowe i jakościowe zakładu. Na tym etapie doprecyzowywane są również szczegóły dotyczące integracji z systemami sterowania oraz zbierania danych.

Etap 6: Wdrożenie na produkcji, kalibracja i szkolenie personelu

Po zakończeniu prac przygotowawczych system jest instalowany w zakładzie i uruchamiany w warunkach rzeczywistych. Przeprowadzana jest kalibracja w oparciu o dane pochodzące bezpośrednio z bieżącej produkcji. Jednocześnie realizowane są szkolenia dla personelu produkcyjnego, działu jakości oraz utrzymania ruchu. Szkolenia obejmują zarówno obsługę systemu Spectrally, jak i interpretację wyników pomiarów w codziennej pracy.

Etap 7: Wsparcie powdrożeniowe i rozwój systemu

Po wdrożeniu zapewniane jest regularne wsparcie techniczne, bieżące aktualizacje algorytmów oraz możliwość dalszego rozwoju systemu w oparciu o nowe potrzeby partnera. Współpraca może obejmować również cykliczne szkolenia oraz wsparcie w zakresie integracji danych pomiarowych z systemami raportowania i dokumentacji jakościowej.

7.2 Kluczowe czynniki sukcesu wdrożenia

Aby wdrożenie technologii Spectrally w zakładzie produkcyjnym zakończyło się sukcesem, konieczne jest uwzględnienie kilku kluczowych elementów organizacyjnych i technologicznych. Sukces wdrożenia zależy nie tylko od wyboru odpowiedniego rozwiązania technicznego, ale przede wszystkim od dobrze zaplanowanego procesu oraz zaangażowania wszystkich interesariuszy.

Współpraca interdyscyplinarna

Efektywne wdrożenie wymaga ścisłej współpracy pomiędzy różnymi działami w organizacji – w szczególności produkcją, jakością, technologią, utrzymaniem ruchu, działem IT oraz osobami odpowiedzialnymi za zgodność regulacyjną. Zaangażowanie tych zespołów już na etapie studium wykonalności oraz analizy procesu produkcyjnego pozwala precyzyjnie określić potrzeby i uwarunkowania wdrożenia.

Zalecenie: Warto powołać dedykowany zespół projektowy odpowiedzialny za nadzorowanie całego procesu wdrożeniowego i koordynację komunikacji pomiędzy poszczególnymi działami.

Zarządzanie zmianą

Wprowadzenie pomiarów inline oraz nowych procedur pracy bezpośrednio w linii produkcyjnej to realna zmiana organizacyjna. Dlatego szczególne znaczenie ma przygotowanie zespołu do pracy z nową technologią. Kluczowe jest nie tylko szkolenie techniczne, ale również budowanie świadomości korzyści wynikających z wdrożenia.

Zalecenie: Warto zaplanować działania edukacyjne obejmujące zarówno operatorów, jak i kadrę zarządzającą. Zrozumienie praktycznej wartości wdrożenia znacząco zwiększa akceptację i zaangażowanie pracowników.

Zapewnienie jakości danych

Systemy inline, takie jak Spectrally, opierają się na danych procesowych pozyskiwanych bezpośrednio z linii produkcyjnych. Wiarygodność tych danych ma kluczowe znaczenie dla dalszej analizy oraz codziennego podejmowania decyzji produkcyjnych.

Zalecenie: Regularna kalibracja systemu na podstawie danych rzeczywistych z bieżącej produkcji oraz bieżąca ocena jakości danych powinny zostać wpisane w standardowe procedury operacyjne.

Realistyczne planowanie zakresu wdrożenia

Ważnym elementem jest zaplanowanie wdrożenia w sposób, który uwzględnia możliwości technologiczne, specyfikę produkcji oraz oczekiwania partnera w zakresie korzyści biznesowych. Wspólne opracowanie planu wdrożenia z uwzględnieniem etapów, punktów pomiarowych i sposobu integracji minimalizuje ryzyko niepowodzenia projektu.

Zalecenie: Projekt warto przygotować w sposób modułowy, umożliwiający jego późniejszą rozbudowę o kolejne punkty pomiarowe lub zastosowania w innych zakładach w ramach grupy kapitałowej.

7.3 Najczęstsze błędy wdrożeniowe i jak ich unikać

Pomimo rosnącej dostępności systemów inline, nieprawidłowe planowanie i realizacja wdrożenia mogą ograniczyć jego skuteczność. Poniżej przedstawiono najczęstsze błędy obserwowane przy wdrażaniu technologii inline w zakładach produkcyjnych oraz sposoby ich unikania.

Błąd 1: Ograniczenie wdrożenia tylko do jednego etapu procesu

W niektórych projektach wdrożenie ogranicza się wyłącznie do jednego punktu pomiarowego, co utrudnia pełne wykorzystanie potencjału systemu inline i nie pozwala na uzyskanie ciągłego wglądu w cały proces produkcyjny.

Jak unikać: Warto od początku zaplanować wdrożenie w taki sposób, aby obejmowało ono wszystkie kluczowe punkty produkcyjne – od surowców, przez reakcje procesowe, aż po produkt gotowy. Analiza całościowego przepływu materiału zapewnia pełną identyfikowalność i maksymalne wykorzystanie technologii inline.

Błąd 2: Niedostateczne zaangażowanie operatorów i personelu produkcyjnego

Brak włączenia operatorów w proces wdrożeniowy oraz w przygotowanie praktycznych aspektów korzystania z systemu może prowadzić do oporu przed jego stosowaniem, a także do błędów w codziennej obsłudze.

Jak unikać: Operatorzy powinni aktywnie uczestniczyć w całym procesie wdrożenia – od etapu analizy procesu, przez testy na produkcji, aż po szkolenia końcowe. Uwzględnienie ich doświadczenia zwiększa skuteczność wdrożenia oraz poziom jego akceptacji.

Błąd 3: Ograniczona weryfikacja i brak dostosowania systemu do rzeczywistych warunków produkcyjnych

Zbyt szybkie przejście od instalacji systemu do jego pełnej eksploatacji bez szczegółowego dostosowania i kalibracji algorytmów do danych z rzeczywistej produkcji może prowadzić do nieprawidłowych interpretacji wyników i problemów z jakością danych.

Jak unikać: Należy przeznaczyć odpowiednią ilość czasu na prace technologiczne, testy i kalibrację w warunkach rzeczywistych. Dane z bieżącej produkcji powinny być podstawą do dostosowania działania systemu oraz oceny jego skuteczności.



ROZDZIAŁ

8

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podsumowanie i wnioski

Sektor produkcji żywic syntetycznych stoi obecnie w obliczu bezprecedensowych wyzwań regulacyjnych, technologicznych i środowiskowych. Nowe wymagania Unii Europejskiej – od CSRD, przez REACH, po Waste Framework Directive – nie tylko redefiniują obowiązki raportowe, ale również zmuszają producentów do głębokiej transformacji swoich procesów operacyjnych. W tym kontekście kluczowe stają się rozwiązania umożliwiające ciągłe monitorowanie, automatyzację pomiarów oraz pełną identyfikowalność danych procesowych.

Przedstawione w niniejszym dokumencie podejście – łączące założenia Quality 4.0 z zaawansowanymi technikami analitycznymi, takimi jak spektroskopia Ramana – pokazuje, że wdrożenie nowoczesnych narzędzi pomiarowych w modelu inline przynosi wymierne korzyści zarówno operacyjne, jak i strategiczne. Analiza wdrożeń potwierdza, że możliwe jest osiągnięcie szybkiego zwrotu z inwestycji, znaczące skrócenie cykli produkcyjnych, redukcja strat surowcowych oraz poprawa efektywności energetycznej bez konieczności rozbudowy infrastruktury.

Kluczowym wnioskiem płynącym z przedstawionych danych jest to, że technologie inline umożliwiają przesunięcie punktu kontroli jakości bezpośrednio do miejsca zachodzenia procesów chemicznych. Dzięki temu firmy nie tylko zyskują pełną kontrolę nad jakością i parametrami produkcji w czasie rzeczywistym, ale również budują fundament pod efektywne raportowanie ESG, automatyzację audytów zgodności i rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym.

W kontekście stale rosnących wymagań legislacyjnych oraz presji rynkowej na redukcję wpływu środowiskowego, organizacje, które zainwestują w nowoczesne systemy kontroli inline i cyfrową transformację procesów jakościowych, zyskają trwałą przewagę konkurencyjną. Przemysł chemiczny – w tym segment produkcji żywic – ma szansę nie tylko dostosować się do nowych regulacji, ale stać się liderem odpowiedzialnej, zrównoważonej i efektywnej produkcji w erze przemysłu 5.0.

Bibliografia

- Antony, J., Sony, M., Sunder M.V., Douglas, J.A. and McDermott, O. (2020) 'Quality 4.0 conceptualisation and practical applications: A review of current status and future perspectives', TQM Journal, 32(4), pp. 779–793.
- European Chemicals Agency (2023) Understanding REACH: The Basics of REACH Regulations. Available at: <https://echa.europa.eu/regulations/reach> (Accessed: 20 June 2025).
- European Commission (2018) Waste Framework Directive (2008/98/EC). Available at: https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en (Accessed: 20 June 2025).
- European Commission (2020a) Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. Available at: <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/> (Accessed: 20 June 2025).
- European Commission (2020b) REACH: Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals. Available at: https://ec.europa.eu/growth/sectors/chemicals/reach_en (Accessed: 20 June 2025).
- European Commission (2022) Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD). Available at: https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en (Accessed: 20 June 2025).
- European Commission (2023) Energy Efficiency Directive: Updated Rules 2023. Available at: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules_en (Accessed: 20 June 2025).
- European Parliament (2022a) Regulation (EU) 2020/852 on Sustainable Finance (EU Taxonomy). Official Journal of the European Union.
- European Parliament (2022b) Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD). Official Journal of the European Union.
- European Parliament (2022c) Fit for 55 Package: Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality. Available at: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-fit-for-55-package> (Accessed: 20 June 2025).
- Long, D. A. (2002) The Raman Effect: A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules. Chichester: John Wiley & Sons.
- PwC (2023) ESG Reporting: The New Standard for European Businesses. Available at: <https://www.pwc.com/gx/en/services/sustainability/publications/esg-reporting.html> (Accessed: 20 June 2025).

- Schroeder, R.G., Linderman, K., Liedtke, C. and Choo, A.S. (2019) 'Six Sigma and Quality Management in Industry 4.0 Era', *Quality Management Journal*, 26(2), pp. 33–49.
- Smith, B. C., Brown, J. A. and Clarke, E. J. (2019) *Process Analytical Technology for the Chemical Industry: Applications of Raman Spectroscopy*. New York: Springer.
- Srinivasan, V. and Mukherjee, D. (2022) *Big Data and Quality 4.0: Principles, Systems and Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- Polska Izba Przemysłu Chemicznego (2024) *Manifest Polskiej Chemii*. Warszawa: PIPC. Dostępne pod adresem: <https://pipc.org.pl/> (dostęp: 24 czerwca 2025 r.).



gekko
photonics