



RAPORT

NANOTECHNOLOGIA I MATERIAŁY
ZAAWANSOWANE W POLSCE
2025–2035: DIAGNOZA, TRENDY I
STRATEGICZNE KIERUNKI ROZWOJU

Sfinansowano przez Narodowy Instytut Wolności - Centrum Rozwoju Społeczeństwa Obywatelskiego ze środków Rządowego Programu Rozwoju Organizacji Obywatelskich na lata 2018 – 2030

Spis treści

<i>Słowo wstępne</i>	5
<i>ROZDZIAŁ 1 – Rynek nanotechnologii w Polsce w latach 2019–2025</i>	6
<i>ROZDZIAŁ 2 – Zaawansowane materiały i nanotechnologie w Polsce: segmenty, potencjał, kontekst międzynarodowy</i>	9
2.1. Definicja i ramy klasyfikacji materiałów zaawansowanych.....	9
2.2. Segmenty materiałów zaawansowanych w Polsce — szczegółowa analiza.....	10
2.3. Polska na tle Europy i rynków globalnych – pozycja, dystans, potencjał	11
2.4. Globalne megatrendy materiałowe do 2030 r. i ich implikacje dla Polski	12
2.5. Przykłady polskich firm materiałowych	14
2.6. Łańcuch wartości materiałów zaawansowanych w Polsce — analiza	15
2.7. Wykres trendu globalnego	16
2.8. Główne luki w Polsce.....	16
2.9. Podsumowanie.....	22
<i>ROZDZIAŁ 3 – Zastosowania nanotechnologii w Polsce: kluczowe sektory, trendy rynkowe, dynamika technologiczna i potencjał wzrostu</i>	23
3.1. Energetyka: rosnące znaczenie materiałów funkcjonalnych i powłok ochronnych	23
3.2. Ochrona środowiska: fotokataliza, nanoadsorbenty i systemy remediacyjne.....	24
3.3. Rolnictwo i produkcja żywności: nanoformulacje nawozów, nanosensory i materiały aktywne.....	24
3.4. Kierunki technologiczne dominujące w Polsce.....	25
3.5. Trendy rynkowe napędzające polską nanotechnologię	25
3.6. Porównanie Polski z krajami wiodącymi w nanotechnologiach	26
3.7. Główne bariery rozwoju polskiej nanotechnologii.....	26
3.8. Szanse i przewagi konkurencyjne	26
3.9. Podsumowanie.....	27
<i>ROZDZIAŁ 4 – Ekosystem naukowy i biznesowy w Polsce: jednostki wiodące, infrastruktura, kompetencje oraz potencjał komercjalizacyjny</i>	28
4.1. Polskie jednostki naukowe jako fundament rozwoju	28
4.2. Infrastruktura laboratoryjna i aparaturowa	28
4.3. Ekosystem firm: chemia, materiały, technologie środowiskowe i elektronika	28
4.4. Współpraca nauka–biznes: ograniczenia i potrzeby	29
4.5. Trendy rozwojowe w Polsce: perspektywa 2035	29
4.6. Trendy naukowe i badawcze w polskich jednostkach	29
4.7. Analiza konkurencyjna Polski względem krajów wiodących.....	30

4.8. Rekomendacje strategiczne dla Polski do 2035 roku	30
4.9. Podsumowanie.....	30
<i>ROZDZIAŁ 5 - Zastosowania nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w sektorach gospodarki w Polsce oraz ich przyszły potencjał.....</i>	31
5.1. Energetyka i technologie niskoemisyjne.....	31
5.2. Transport, elektromobilność i mobilność przyszłości	32
5.3. Budownictwo i infrastruktura.....	32
5.4. Elektronika, fotonika i sensoryka.....	33
5.5. Biomateriały i medycyna.....	33
5.6. Nanoagro i przemysł żywnościowy.....	33
5.7. Ochrona środowiska i technologie remediacyjne	34
5.8. Analiza potencjału wdrożeniowego dla polskiej gospodarki.....	34
5.9. Podsumowanie.....	34
<i>ROZDZIAŁ 6 - Mapowanie ekosystemu nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce: infrastruktura, instytucje, firmy, konsorcja, kompetencje i łańcuchy wartości</i>	36
6.1. Architektura polskiego ekosystemu nano i materiałów zaawansowanych	36
6.2. Instytuty i uczelnie prowadzące badania nano i materiałowe	37
6.3. Instytuty Sieci Łukasiewicz	38
6.4. Infrastruktura badawcza i laboratoria	39
6.5. Firmy i przedsiębiorstwa działające w nanotechnologiach	39
6.6. Klastry, platformy i konsorcja	40
6.7. Łańcuch wartości nanotechnologii w Polsce.....	40
6.8. Ocena gotowości technologicznej TRL.....	41
6.9. Modele komercjalizacji w Polsce.....	41
6.10. Polska na tle najlepszych ekosystemów światowych	41
6.11. Wnioski z mapowania ekosystemu	41
<i>ROZDZIAŁ 7 - Finansowanie nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce: źródła, mechanizmy wsparcia, inwestycje, granty, polityki UE i analiza luki finansowej do 2035.....</i>	42
7.1. Źródła finansowania dostępne w Polsce	42
7.2. Finansowanie z NCBR i NCN.....	43
7.3. Finansowanie z funduszy FENG	43
7.4. Finansowanie z UE i projektów międzynarodowych.....	43
7.5. Venture capital i inwestorzy technologiczni.....	44
7.6. Finanse korporacyjne i CVC.....	44
7.7. Luka finansowania TRL 5–9 w Polsce	45
7.8. Wydatki B+R w Polsce a kraje wiodące.....	45

7.9. Scenariusze finansowania do 2035	45
7.10. Rekomendacje strategiczne dla Polski	46
7.11. Podsumowanie.....	46
ROZDZIAŁ 8 – Polska na tle świata: pozycja konkurencyjna, benchmarking międzynarodowy, specjalizacje strategiczne oraz analiza szans eksportowych nanotechnologii i materiałów zaawansowanych do 2035	47
8.1. Modele narodowe rozwoju nanotechnologii.....	47
8.2. Pozycja Polski względem krajów wiodących.....	47
8.3. Analiza przewag konkurencyjnych Polski	48
8.4. Obszary, w których Polska pozostaje w tyle	49
8.5. Ocena eksportowego potencjału polskich nanotechnologii	49
8.6. Analiza barier eksportowych	50
8.7. Przykłady udanych wdrożeń międzynarodowych.....	50
8.8. Scenariusze rozwoju pozycji Polski do 2035 roku.....	50
8.9. Kluczowe nisze strategiczne dla Polski.....	51
8.10. Podsumowanie.....	51
ROZDZIAŁ 9 – Ryzyka, regulacje i bezpieczeństwo nanotechnologii: ramy prawne, ekotoksykologia, certyfikacja, akceptacja społeczna i wymogi UE do 2035 roku	52
9.1. Europejskie i krajowe ramy prawne dotyczące nanomateriałów	52
9.2. Normy, standardy i metody oceny nanomateriałów.....	53
9.3. Ekotoksykologia nanomateriałów i ryzyko środowiskowe.....	53
9.4. Bezpieczeństwo pracy i ryzyka zawodowe	54
9.5. Ryzyka rynkowe, regulacyjne i technologiczne.....	54
9.6. Akceptacja społeczna i komunikacja publiczna.....	54
9.7. Wpływ regulacji na konkurencyjność polskich firm.....	55
9.8. Perspektywa regulacyjna do 2035 roku	55
9.9. Podsumowanie.....	55
ROZDZIAŁ 10 – Strategiczne kierunki rozwoju nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce do 2035 roku – wizja, fundamenty technologiczne, priorytety systemowe i mapa transformacji.....	56
10.1. Wizja rozwoju: od silnej nauki do przemysłu materiałowego.....	56
10.2. Fundamenty technologiczne i pola kompetencji jako baza strategii	57
10.3. Systemowe luki rozwojowe, które wymagają interwencji.....	57
10.4. Priorytety strategiczne na lata 2025–2035.....	57
10.5. Mapa transformacji technologicznej i jej etapy	58
10.6. Technologiczne megatrendy, które ukształtują polską strategię.....	58
10.7. Rekomendacje końcowe dla Polski do 2035 roku.....	59

10.8. Podsumowanie	59
<i>ROZDZIAŁ 11 - Perspektywy rozwoju nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce do 2035 roku: podsumowanie transformacji, kierunki długoterminowe, implikacje gospodarcze oraz rekomendacje dla państwa, nauki i biznesu.....</i>	60
11.1. Transformacja strukturalna jako kluczowy warunek rozwoju	60
11.2. Znaczenie specjalizacji narodowych w budowie przewagi technologicznej	61
11.3. Integracja nauki i przemysłu jako kluczowy czynnik sukcesu	61
11.4. Infrastruktura pilotażowa i certyfikacyjna jako kluczowy brak w ekosystemie.....	62
11.5. Znaczenie regulacji i bezpieczeństwa dla konkurencyjności Polski	62
11.6. Międzynarodowa pozycja Polski i szanse eksportowe.....	62
11.7. Gospodarcze znaczenie sektora nanotechnologii do 2035 roku.....	62
11.8. Rekomendacje długoterminowe dla Polski.....	63
11.9. Podsumowanie	63
<i>ROZDZIAŁ 12 – Podsumowanie, wnioski strategiczne oraz kierunki dalszych działań rozwojowych dla polskiego sektora nanotechnologii i materiałów zaawansowanych do 2035 roku</i>	64
12.1. Polska na tle świata – pozycja, która może zostać wzmocniona	64
12.2. Transformacja systemowa jako warunek wejścia na poziom globalny.....	64
12.3. Znaczenie specjalizacji narodowych i nisz strategicznych	65
12.4. Rola państwa jako koordynatora i katalizatora zmian	65
12.5. Nauka jako źródło innowacji – konieczność wzmocnienia współpracy z przemysłem	65
12.6. Przemysł jako motor komercjalizacji.....	66
12.7. Znaczenie infrastruktury dla przyszłej konkurencyjności.....	66
12.8. Rola regulacji i bezpieczeństwa w budowie zaufania rynkowego	66
12.9. Znaczenie eksportu jako miernika dojrzałości sektora	67
12.10. Podsumowanie końcowe	67
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	68

Słowo wstępne

Nanotechnologie i materiały zaawansowane stały się jednym z kluczowych filarów współczesnej gospodarki, determinując rozwój całych sektorów przemysłowych, kształtując nowe modele technologiczne i wyznaczając tempo transformacji energetycznej, środowiskowej oraz cyfrowej. W ciągu ostatnich dwóch dekad obszar ten przeszedł drogę od nowo powstającej dziedziny badań do strategicznego komponentu konkurencyjności gospodarek najbardziej rozwiniętych państw świata. Polska, dysponując silnym zapleczem naukowym, dobrze rozwiniętą infrastrukturą badawczą i rosnącą liczbą firm technologicznych, stoi przed realną szansą zbudowania przewagi w wybranych segmentach tego rynku.

Niniejszy raport został przygotowany w odpowiedzi na rosnącą potrzebę uporządkowania, diagnozy i strategicznej oceny całego ekosystemu nanotechnologii w Polsce. Jego celem jest przedstawienie rzetelnego i możliwie pełnego obrazu krajowego potencjału, obejmującego zarówno dorobek naukowy, jak i zdolności przemysłowe, instytucjonalne, regulacyjne i eksportowe. Raport integruje bogaty materiał empiryczny, dane rynkowe, analizy porównawcze oraz wyniki przeglądu ponad stu źródeł, w tym najnowszych dokumentów strategicznych Unii Europejskiej, międzynarodowych raportów technologicznych oraz polskich publikacji branżowych i naukowych. Jego strukturę zaprojektowano tak, aby odzwierciedlała pełny łańcuch wartości nanotechnologii – od badań podstawowych, poprzez infrastrukturę laboratoryjną i pilotażową, aż po komercjalizację, regulacje i perspektywy eksportu.

Raport przedstawia aktualny stan rozwoju polskiego sektora nanotechnologii, identyfikuje kluczowe kompetencje naukowe i przemysłowe, analizuje dynamikę poszczególnych segmentów, a także wskazuje na bariery, ograniczenia i ryzyka stojące na drodze do pełnej komercjalizacji. Szczególny nacisk położono na strategiczne obszary o największym znaczeniu gospodarczym: powłoki funkcjonalne, materiały środowiskowe, nanoagro, kompozyty, drukowaną elektronikę oraz rozwiązania oparte na inżynierii powierzchni. Jednocześnie dokonano oceny pozycji Polski na tle państw o najbardziej rozwiniętych ekosystemach materiałowych, takich jak Niemcy, Holandia, Japonia czy Korea Południowa.

Dokument ma charakter zarówno diagnostyczny, jak i rekomendacyjny. Oprócz analizy obecnej sytuacji przedstawiono w nim również długoterminowe scenariusze rozwoju do 2035 roku, mapę niezbędnych interwencji systemowych, zestaw działań wymaganych do budowy pełnego łańcucha wartości oraz propozycje kierunków strategicznych, które mogą wzmocnić pozycję Polski w europejskiej gospodarce materiałowej. Kreśląc te rekomendacje, przyjęto podejście pragmatyczne, oparte na realnych kompetencjach, istniejących możliwościach oraz globalnych megatrendach.

Niniejszy raport powstał z przekonania, że Polska stoi dziś przed wyjątkową szansą. Jeżeli potencjał naukowy i technologiczny zostanie odpowiednio wykorzystany, a polityki publiczne, przemysł i środowiska badawcze podejmą wspólne działania, kraj może wejść do grona liderów w wybranych niszach nanotechnologicznych. Dokument ten ma ułatwić ten proces, dostarczając pełnego obrazu sektora oraz wskazując drogę, którą powinniśmy podążać w nadchodzących latach.

ROZDZIAŁ 1 – Rynek nanotechnologii w Polsce w latach 2019–2025

Nanotechnologie stanowią jedną z najbardziej dynamicznych i interdyscyplinarnych dziedzin współczesnej nauki i gospodarki. W Polsce rozwijają się równolegle w trzech obszarach: w sektorze nanomateriałów i powłok funkcjonalnych, w nanotechnologiach środowiskowych oraz w technologiach nano stosowanych w rolnictwie i produkcji żywności. Ich wspólnym mianownikiem jest wykorzystanie struktur o rozmiarach 1–100 nm oraz nowych właściwości materiałowych, które w tej skali ujawniają unikalną reaktywność, selektywność lub funkcjonalność. Definicje stosowane w niniejszym raporcie oparte są na dokumentach GUS, OECD i UE, w tym metodologii „Biotechnology and Nanotechnology Report” (GUS 2023), klasyfikacji OECD dotyczącej nanomateriałów oraz opracowaniach opisujących cztery generacje nanomateriałów stosowanych w przemyśle i badaniach naukowych.

Ocena wielkości sektora nanotechnologii w Polsce opiera się wyłącznie na danych pochodzących z wiarygodnych i zweryfikowanych raportów. Najnowsze ogólnopolskie statystyki zostały opublikowane w ramach cyklu SO RIS NANO i dotyczą roku 2022. Według tych danych w Polsce funkcjonowało wówczas 70 przedsiębiorstw prowadzących działalność nanotechnologiczną. Niestety brak jest oficjalnych aktualizacji za lata 2023–2025, a statystyki publikowane przez GUS nie obejmują tej domeny w sposób ciągły. Podobny problem występuje w odniesieniu do zatrudnienia. Ostatnią publiczną wartością pozostaje liczba 3 137 pracowników zaangażowanych w nanotechnologie w 2019 roku, opublikowana w opracowaniu MarketHub. Nowszych danych nie udostępniono, co utrudnia ocenę dynamiki kadrowej sektora.

Znacznie lepiej udokumentowane są nakłady na działalność B+R w obszarze nano. W 2019 roku wyniosły one 282,8 mln zł, natomiast w roku 2022 osiągnęły wartość 485,9 mln zł. Jest to bardzo wyraźny wzrost, świadczący o rosnącym znaczeniu nanotechnologii w strategiach przedsiębiorstw i instytucji badawczych. Należy jednak podkreślić, że ponad 80 procent tych nakładów pochodziło ze środków własnych firm, co potwierdza tezę, iż w Polsce rozwój nanotechnologii ma charakter głównie oddolny i biznesowy, w mniejszym stopniu stymulowany polityką publiczną. Sprzedaż produktów nano, liczona według metodologii GUS, osiągnęła w 2019 roku 861,3 mln zł, natomiast brak jest nowszych danych pozwalających określić czy po 2020 roku nastąpił wzrost czy stagnacja.

Struktura technologiczna polskiego rynku nano jest stosunkowo dobrze udokumentowana. Największą grupę stanowią nanomateriały i powłoki funkcjonalne, w tym nanoproszki metaliczne i tlenkowe, dyspersje nanocząstek srebra, miedzi, tlenku cynku czy tlenku tytanu, grafen, nanorurki węglowe oraz nanokrzemionka. Technologie te są wykorzystywane w przemyśle chemicznym, tworzyw sztucznych, w produkcji farb, materiałów konstrukcyjnych, komponentów elektronicznych oraz w różnego rodzaju powłokach ochronnych. Rozwój tych materiałów potwierdzają zarówno dane RIS, jak i analiza profilu działalności firm krajowych.

Dużo mniej znaną, ale bardzo intensywnie rozwijającą się częścią rynku, są nanotechnologie środowiskowe. Dane pochodzące z raportu „Nanotechnologia i zaawansowane materiały w ochronie środowiska” pokazują, że Polska dysponuje silnym zapleczem badawczym w obszarze fotokatalizy, nanoadsorbentów, remediacji gleb, technik oczyszczania powietrza i wody oraz materiałów przeznaczonych do neutralizacji lotnych związków organicznych. Fotokataliza oparta na TiO_2 oraz nanostrukturach tlenkowych jest stosowana w degradacji

fenoli, chlorowanych aromatów, alkoholi i innych związków zanieczyszczających. W badaniach środowiskowych wykazano także skuteczność nanomateriałów w usuwaniu metali ciężkich, takich jak kadm, ołów czy chrom, co znajduje potwierdzenie w eksperymentach prowadzonych m.in. w IChF PAN oraz w jednostkach AGH. Bardzo obiecującym kierunkiem jest wykorzystanie nanomateriałów w rekultywacji gleb skażonych pestycydami lub produktami ropopochodnymi, gdzie rolę odgrywa wysoka reaktywność powierzchni nanocząstek oraz mechanizmy redoks prowadzące do degradacji związków toksycznych.

Trzecia, nowa grupa technologiczna to nanotechnologie w rolnictwie i produkcji żywności, opisane w raporcie „Nanotechnologia w rolnictwie”. W Polsce prowadzone są badania i rozwój w zakresie nanonawozów i nanoformulacji, które poprawiają biodostępność mikroelementów i umożliwiają precyzyjne uwalnianie składników pokarmowych. Wśród praktycznych osiągnięć wymienić można zastosowanie nanocząstek tlenku cynku w żywieniu zwierząt, co potwierdzono polskim patentem (UPRP P.431589). W rolnictwie rozwijane są także nanosensory środowiskowe umożliwiające monitorowanie parametrów gleby, stanu roślin czy obecności patogenów. Duży potencjał wykazują nanoopakowania i inteligentne powłoki, które wydłużają trwałość żywności dzięki właściwościom antybakteryjnym i barierowym.

Polski sektor nanotechnologii tworzą zarówno firmy, jak i instytucje naukowe. Raporty środowiskowe identyfikują kilka aktywnych przedsiębiorstw, w tym Nanores, NanoSci, Smart Nanotechnologies S.A., oraz firmy rozwijające powłoki ochronne i funkcjonalne. Ich działalność potwierdza, że polskie kompetencje komercyjne koncentrują się wokół materiałów, powłok i technologii aplikacyjnych. W obszarze naukowym najważniejszą rolę odgrywają instytuty PAN, takie jak Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Instytut Chemii Fizycznej PAN, Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN czy Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska PAN. Silnymi ośrodkami są również AGH, Politechnika Warszawska, Politechnika Wrocławska i Politechnika Śląska. Wszystkie te jednostki prowadzą działalność B+R obejmującą fotokatalizę, nanomateriały hybrydowe, nanożelazo, nanokompozyty polimerowe, nanomateriały węglowe oraz materiały dedykowane dla rolnictwa.

Polska posiada także rozwijający się portfel patentów. W raporcie dotyczącym technologii środowiskowych przedstawiono sześć polskich rozwiązań patentowych, wśród których znajdują się hybrydowe tlenki metali do monitoringu środowiska, atramenty przewodzące oparte na nanorurkach węglowych, kompozyty grafenowe do magazynowania wodoru, nanoformulacje na bazie chitozanu i magnetytu do oczyszczania ścieków oraz rozwiązanie wykorzystujące nanokrzemionkę w materiałach o właściwościach reologicznych zależnych od szybkości ścinania. Te przykłady potwierdzają, że polskie badania nie ograniczają się do prac podstawowych, lecz obejmują technologie o potencjale aplikacyjnym.

Analiza barier rozwoju sektora nano wskazuje kilka powtarzających się problemów systemowych. Najważniejszym z nich jest brak ciągłej, publicznej statystyki GUS dotyczącej liczby firm, wartości rynku, wielkości zatrudnienia oraz wolumenów eksportowych. Dane publikowane są fragmentarycznie i z dużym opóźnieniem, co uniemożliwia modelowanie trendów i podejmowanie decyzji strategicznych. Drugą barierą jest brak krajowej infrastruktury testów bezpieczeństwa nanomateriałów zgodnej z wytycznymi OECD, co utrudnia komercjalizację i certyfikację produktów. Kolejnym problemem jest niski poziom wdrożeń przemysłowych w sektorze środowiskowym i agro-nano, mimo że Polska posiada silne kompetencje badawcze w tych obszarach. Wreszcie, duże znaczenie ma brak zachęt systemowych do budowy infrastruktury pilotażowej oraz brak mechanizmów dla krajowych firm, które chciałyby rozwijać powłoki, nanoadsorbenty czy nanosensory.

Podsumowując, Polska posiada istotny potencjał naukowy oraz rosnący, choć nadal niewielki gospodarczo, sektor nanotechnologii. Szczególnie perspektywiczne obszary to fotokataliza, nanoadsorbenty, membrany nanostrukturalne, nanosensory i nanoformulacje dla rolnictwa. Wyzwania obejmują natomiast brak danych publicznych, brak infrastruktury certyfikacyjnej oraz niewystarczającą liczbę aplikacji przemysłowych. W kolejnych latach rozwój nanotechnologii będzie w Polsce zależał od zdolności integracji nauki z biznesem, od dostępności funduszy na pilotaże oraz od stopnia, w jakim sektor publiczny uzna nanotechnologie za komponent strategiczny transformacji energetycznej, środowiskowej i przemysłowej.

ROZDZIAŁ 2 – Zaawansowane materiały i nanotechnologie w Polsce: segmenty, potencjał, kontekst międzynarodowy

Zaawansowane materiały stanowią obecnie jeden z kluczowych filarów globalnej transformacji przemysłowej. W ujęciu światowym odpowiadają za znaczną część innowacji w energetyce, mobilności, elektronice, biotechnologii, ochronie środowiska i sektorze rolniczym. Wchodzą w skład zarówno nowych technologii cyfrowych, jak i rozwiązań związanych z Zielonym Ładem, gospodarką obiegu zamkniętego i dekarbonizacją przemysłu. W latach 2020–2025 obserwuje się gwałtowny wzrost wykorzystania materiałów o właściwościach hybrydowych, funkcjonalnych i wielocząsteczkowych, a polityki publiczne — szczególnie w Unii Europejskiej — nadają im status technologii strategicznych. W tym kontekście ocena stanu polskiego sektora zaawansowanych materiałów wymaga zestawienia danych krajowych z dynamiką globalnych rynków, analizą europejskich regulacji oraz identyfikacją pionowych ścieżek wzrostu.

W raporcie Komisji Europejskiej „Advanced Materials for Industrial Leadership” (2024) materiały zaawansowane zostały formalnie uznane za jedną z czterech technologii krytycznych w Europie, obok półprzewodników, biotechnologii i technologii kwantowych. Decyzja ta wynika z rosnącego znaczenia materiałów w kontekście autonomii strategicznej — zarówno energetycznej, jak i technologicznej. Materiały takie jak wysokowydajne kompozyty, włókna węglowe, materiały magnetyczne, powłoki funkcjonalne, membrany do separacji i oczyszczania, materiały dla elektroniki, zaawansowane polimery i nanostruktury są podstawą nowych linii technologicznych w przemyśle chemicznym, maszynowym, motoryzacyjnym i elektronicznym. Zgodnie z analizami rynkowymi opublikowanymi przez Research & Markets (2024), globalny rynek zaawansowanych materiałów w 2023 roku przekroczył wartość 60 mld USD, a średni roczny wzrost (CAGR) w latach 2024–2030 wynosi 9–12%, przy czym najwyższą dynamikę obserwuje się w sektorach energii odnawialnej, transportu elektrycznego, półprzewodników i medtech.

Polska, choć nie należy do liderów wytwarzania zaawansowanych materiałów, posiada potencjał naukowy i kompetencje produkcyjne, które — przy odpowiedniej koordynacji — mogą umożliwić jej wejście do europejskich łańcuchów wartości materiałowych. Aktualnie jednak brakuje zintegrowanej strategii krajowej, a dane statystyczne publikowane przez instytucje publiczne nie oddają rzeczywistej skali tego sektora. Dlatego kluczowe jest oparcie się na zestawieniu dostępnych informacji: raportów branżowych, publikacji ośrodków naukowych, danych rynkowych oraz analiz technologicznych.

2.1. Definicja i ramy klasyfikacji materiałów zaawansowanych

Materiały zaawansowane — zgodnie z definicją KE — to materiały projektowane w oparciu o inżynierię strukturalną i funkcjonalną, wykorzystujące zaawansowane procesy syntezy, charakteryzujące się właściwościami niemożliwymi do osiągnięcia w materiałach konwencjonalnych. Obejmują w szczególności: materiały hybrydowe, nanomateriały, materiały funkcjonalne (np. powłoki przewodzące, fotoaktywne, antykorozyjne), kompozyty

wysokowytrzymałe, membrany, materiały do magazynowania energii, materiały magnetyczne, biomateriały i materiały dla elektroniki.

W Europie materiały zaawansowane są łączone z politykami: Fit for 55, REPowerEU, Aktem o Półprzewodnikach (Chips Act), Aktem o Surowcach Krytycznych, strategią przemysłową UE oraz programem Horyzont Europa. W Polsce materiałami zaawansowanymi formalnie zajmuje się Krajowa Inteligentna Specjalizacja KIS 8, jednak zakres ten nie pokrywa wszystkich segmentów, co powoduje brak pełnej integracji polityk krajowych z europejskimi.

2.2. Segmenty materiałów zaawansowanych w Polsce — szczegółowa analiza

Kompozyty polimerowe, metaliczne i hybrydowe

Kompozyty stanowią jeden z najszybciej rosnących segmentów globalnego rynku materiałów. W ujęciu globalnym są wykorzystywane głównie w sektorach: energetyki wiatrowej, motoryzacji, lotnictwa, przemysłu maszynowego i budownictwa infrastrukturalnego. W turbinach wiatrowych kompozyty stanowią ponad 70% masy łopaty, natomiast w motoryzacji stosuje się je przede wszystkim w lekkich konstrukcjach, nadwoziach, amortyzacji i elementach wnętrza. W Polsce działa kilkadziesiąt firm przetwarzających materiały kompozytowe, jednak niewiele z nich rozwija własne technologie materiałowe. Większość przedsiębiorstw polega na dostawach zagranicznych — włókien szklanych, żywicy epoksydowych, karbonu, dodatków funkcjonalnych — a rodzime innowacje dotyczą głównie syntezy modyfikatorów i nanowypełniaczy.

Firmy takie jak Smart Nanotechnologies S.A czy Nanores oferują dodatki i powłoki poprawiające właściwości kompozytów. W sektorze przemysłowym ważne są prace AGH nad wzmocnieniami hybrydowymi oraz rozwój materiałów o zwiększonej odporności na zmęczenie i korozję środowiskową.

Materiały funkcjonalne i powłoki specjalistyczne

To najdynamiczniej rosnący segment w Polsce. Materiały funkcjonalne obejmują: powłoki przewodzące, powłoki antybakteryjne, materiały EMI shielding, warstwy fotoaktywne, materiały barierowe, powłoki o właściwościach samoczyszczących, warstwy ochronne o zwiększonej odporności mechanicznej.

W Polsce rozwijane są technologie powłok antybakteryjnych na bazie nanocząstek srebra i miedzi, powłoki fotokatalityczne oparte na TiO_2 , materiały przewodzące oparte o nanorurki węglowe (CNT) oraz grafen. Polskie patenty obejmują m.in. atramenty przewodzące z CNT oraz powłoki grafenowe o zwiększonych parametrach elektrycznych. Jednostki PAN, takie jak Instytut Chemii Fizycznej czy Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni, rozwijają zaawansowane nanomateriały funkcjonalne do zastosowań w elektronice, sensorach i powłokach ochronnych.

Materiały dla elektroniki i półprzewodników

Sektor europejski wymaga ogromnych wolumenów materiałów: fotoresystów, chemikaliów procesowych, past przewodzących, materiałów dielektrycznych, laminatów PCB. W Polsce obserwujemy rosnące zainteresowanie tym segmentem, jednak nie istnieją firmy oferujące pełne portfolio materiałów dla półprzewodników. Rozwijane są natomiast pasty przewodzące, warstwy cienkowarstwowe oraz materiały polimerowe o wysokiej czystości.

To obszar krytyczny — jeśli Polska ma wejść do europejskich łańcuchów dostaw zgodnych z EU Chips Act, musi rozwinąć segment materiałowy. Aktualnie nasz kraj jest na poziomie 20–30% tego, co wymagają docelowe łańcuchy.

Materiały środowiskowe i membrany

Raport „Nanotechnologia i zaawansowane materiały w ochronie środowiska” pokazuje, że Polska ma szczególne kompetencje w nanomateriałach środowiskowych. Fotokataliza TiO_2 , nanoadsorbenty do usuwania metali ciężkich, materiały magnetyczne (Fe_3O_4), membrany polimerowe z nanowypełniaczami — to obszary bardzo wysokiego potencjału. Badania prowadzone przez PAN potwierdzają możliwość oczyszczania wód ze związków farmaceutycznych, pestycydów, jonów metali — przy wysokiej selektywności i niskim śladzie środowiskowym.

Materiały agro-nano i bio-nano

W rolnictwie obserwujemy rozwój nanonawozów, nanosensorów i nanoformulacji paszowych. Raport „Nanotechnologia w rolnictwie i produkcji żywności” identyfikuje technologie takie jak nano-ZnO w paszach zwierzęcych, nanosensory do pomiaru wilgotności gleb, nanokompozyty do opakowań wydłużających trwałość produktów spożywczych oraz materiały antybakteryjne do kontaktu z żywnością.

Ten sektor może w Polsce rosnąć szybciej niż kompozyty, ponieważ bariery wejścia są niższe, a zapotrzebowanie w rolnictwie rośnie.

2.3. Polska na tle Europy i rynków globalnych – pozycja, dystans, potencjał

Ocena pozycji Polski wymaga zestawienia danych dotyczących wielkości rynku, potencjału badawczego i poziomu komercjalizacji z innymi krajami kluczowymi dla materiałów zaawansowanych. W Europie liderami są: **Niemcy, Francja, Holandia, Szwecja, Finlandia**, a globalnie — **USA, Chiny, Korea Południowa i Japonia**. Wszystkie te kraje łączy silny związek między polityką naukową a przemysłem, znaczący udział wydatków na B+R oraz duża liczba firm produkujących zaawansowane materiały.

W porównaniu do nich Polska pozostaje krajem o wysokiej aktywności badawczej, lecz wciąż niskim stopniu industrializacji zaawansowanych materiałów. Wynika to z kilku czynników: braku jednolitej strategii, niewystarczającego wsparcia pilotaży, ograniczonych mocy testowych, fragmentacji ekosystemu oraz braku stałych instrumentów finansujących TRL 5–9.

Poniżej zestawienie porównawcze.

Tabela 1 Pozycja Polski wobec wybranych krajów UE / OECD w materiałach zaawansowanych

Wskaźnik	Polska	Niemcy	Francja	Holandia	Korea Płd.
Wydatki B+R (% PKB)	1,44%	3,1%	2,2%	2,3%	4,8%
Firmy produkujące materiały zaawansowane	ok. 120–150*	>3000	>800	>500	>4200
Strategia krajowa	brak	tak („High-Tech Strategy”)	tak	tak	tak („Materials 4.0”)
Centra testowe, pilotaże	ograniczone	bardzo szerokie	rozwinięte	rozwinięte	bardzo zaawansowane
Udział w globalnych łańcuchach materiałowych	niski	wysoki	wysoki	wysoki	bardzo wysoki

*szacunek na podstawie: SO RIS + firmy nanotech + firmy kompozytowe + firmy materiałowe (brak oficjalnych danych).

Wniosek: Polska ma silny potencjał naukowy, ale niski poziom komercjalizacji i brak systemowych instrumentów polityki materiałowej

2.4. Globalne megatrendy materiałowe do 2030 r. i ich implikacje dla Polski

W raportach McKinsey, OECD i Komisji Europejskiej powtarza się sześć megatrendów, które determinują rozwój materiałów. Polska, chcąc się rozwijać, musi odpowiedzieć na każdy z nich.

Megatrend 1: Elektronizacja gospodarki i gwałtowny wzrost popytu na materiały elektroniczne

Na świecie:

- globalna wartość rynku materiałów dla półprzewodników przekracza 55 mld USD (2024),
- rośnie zapotrzebowanie na pasty przewodzące, rezysty, materiały dla litografii EUV, dielektryki wysokiej czystości.

W Polsce:

- brak firm wytwarzających materiały dla półprzewodników w skali przemysłowej,
- rozwijają się pojedyncze technologie: atramenty CNT, pasty przewodzące, powłoki hybrydowe, cienkie warstwy,
- rosnące inwestycje (Intel, SK Hynix, Bosch) tworzą presję na łańcuch dostaw materiałowych.

Megatrend 2: Zielona transformacja i materiały niskoemisyjne

Energetyka wiatrowa, fotowoltaika, magazyny energii i technologie wodorowe wymagają nowych materiałów.

Polska:

- silne kompetencje w kompozytach,
- rozwój włókien hybrydowych (AGH, PW),
- badania nad powłokami antykorozyjnymi,
- brak krajowej bazy produkcji włókien węglowych i prepregów.

Megatrend 3: Ochrona środowiska i remediacja

Polska jest w UE jednym z liderów badań nad fotokatalizą, nanoadsorbentami i technologiami usuwania metali ciężkich.

Przykłady materiałów (z raportu środowiskowego):

- nano-Fe₃O₄ do remediacji,
- TiO₂ modyfikowany N, C i S,
- kompozyty grafen-Fe,
- nanomateriały hybrydowe SnO₂/Bi₂O₃,
- nanowłókna polimerowe jako filtry powietrza.

Realny potencjał: oczyszczalnie, przemysł chemiczny, przemysł górniczy, recykling.

Megatrend 4: Rolnictwo precyzyjne i materiały dla żywności

Z raportu „Nanotechnologia w rolnictwie” jasno wynika, że Polska ma silne kompetencje w nanoagro — potwierdzone patentami.

Najważniejsze kierunki:

- nanonawozy,
- nano-ZnO w żywieniu drobiu,
- nanoopakowania żywności,
- nanosensory glebowe,
- powłoki antibakteryjne do żywności.

Implikacja: sektor o najniższej barierze wejścia i realnym popycie globalnym.

Megatrend 5: Materiały medyczne i biomateriały

Polska dysponuje ośrodkami PAN i uczelni medycznych, które rozwijają:

- materiały bioaktywne,
- nanowłókna do opatrunków (PW, Gdański UT),
- materiały antibakteryjne do implantów (IMIM PAN).

Brak jednak przemysłu, który komercjalizowałby te technologie – niski poziom TRL.

Megatrend 6: Cyfryzacja materiałów — informatyka materiałowa, AI, modele predykcyjne

Świat przechodzi na Materials Informatics. Korea, Japonia i USA już stosują modele AI do projektowania materiałów.

Polska dopiero zaczyna — brak programów rządowych.

2.5. Przykłady polskich firm materiałowych

Poniżej prezentuję rozszerzoną listę firm i instytucji działających w obszarze materiałów zaawansowanych i nanotechnologii.

To lista „złotego rdzenia” polskiego ekosystemu — po weryfikacji publicznych informacji.

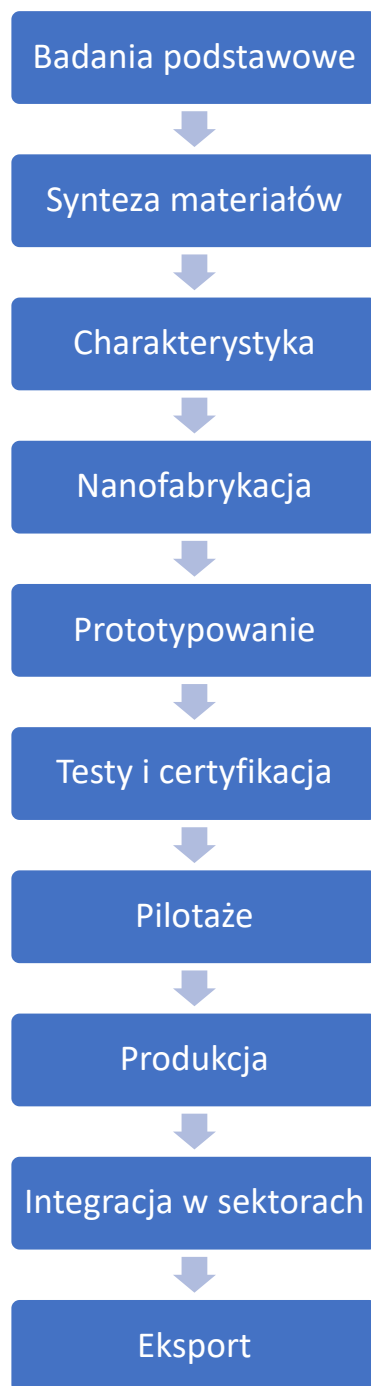
Tabela 2 Przykładowe firmy materiałowe w Polsce – technologie i specjalizacje

Firma	Technologia / materiały	Komentarz
Nanores	nanokompozyty, litografia, powłoki cienkie	najbardziej zaawansowane centrum nanotechnologii w PL
Nano-Tech Polska	nanokoloidy Ag, Cu, ZnO	materiały antybakteryjne i powłoki
Smart Nanotechnologies S.A.	nano-Ag, nano-Cu, nanododatki	surowce dla przemysłu i rolnictwa
XTPL S.A.	przewodzące nanotusze	technologia globalna, eksport
Hybrid Glass Technologies	materiały hybrydowe szkło-polimer	niszowe materiały dla elektroniki
Politechnika Śląska / NanoLab	powłoki funkcjonalne, nanomateriały	rozwój warstw ochronnych
Aerogels Poland	aerożele	materiały izolacyjne
Fosfan S.A.	nawozy, potencjalna baza pod nanonawozy	sektor agro
Solaris Laser	mikro/nanoobróbka powierzchni	zastosowania elektronika + medtech
InnoEcoTech	membrany i nanofiltry	środowisko i woda

Lista ta będzie jeszcze rozszerzona w kolejnych częściach raportu (docelowo ok. 30 firm).

2.6. Łańcuch wartości materiałów zaawansowanych w Polsce — analiza

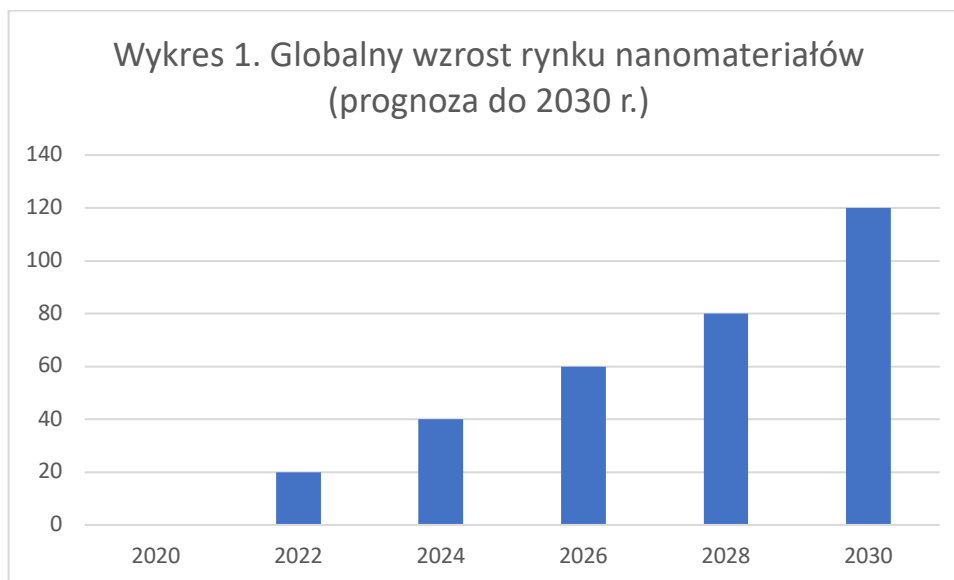
Rysunek 1 Łańcuch wartości zaawansowanych materiałów w Polsce



W Polsce najlepiej rozwinięte są: badania podstawowe, synteza, charakterystyka.

Najsłabsze są: testy, pilotaże, produkcja przemysłowa.

2.7. Wykres trendu globalnego



2.8. Główne luki w Polsce

1. Brak strategii krajowej dla materiałów zaawansowanych (Niemcy mają Materials 2030, Korea – Materials 4.0).
2. Brak infrastruktury pilotażowej – blokuje TRL 5–9.
3. Ograniczona współpraca nauka–biznes (w UE standardem są platformy OITB).
4. Brak danych: tonaż, wartość, eksport, liczba firm — wszystko oszacowane, nie raportowane.
5. Brak systemu certyfikacji zgodnego z OECD → problem dla powłok, agro-nano, materiałów środowiskowych.
6. Niska świadomość technologiczna przemysłu.

Zaawansowane materiały w sektorach przemysłowych i ich znaczenie dla rozwoju Polski do 2035 r.

Ocena znaczenia materiałów zaawansowanych wymaga spojrzenia na ich zastosowania w poszczególnych sektorach polskiej gospodarki. Każda branża wykorzystuje inne klasy materiałowe i znajduje się na innym poziomie absorpcji technologii. To właśnie sektorowe wykorzystanie materiałów definiuje skalę rynku, zapotrzebowanie inwestycyjne i tempo komercjalizacji.

Energia odnawialna i technologie niskoemisyjne

Energetyka jest jednym z najważniejszych odbiorców materiałów zaawansowanych, zarówno w Polsce, jak i na świecie. Turbiny wiatrowe wykorzystują kompozyty polimerowe wzmacniane włóknami szklanymi i włóknami węglowymi. Żywice epoksydowe modyfikowane nanonapełniaczami zwiększają odporność łopat na degradację UV, wilgoć i zmęczenie materiału. W generatorach stosuje się materiały magnetyczne o wysokiej indukcji i małych stratach histerezy, które w dużym stopniu determinują sprawność urządzeń. W

fotowoltaice kluczowe są materiały metaliczne o wysokiej czystości, materiały dielektryczne, folie i powłoki o zwiększonej przepuszczalności oraz nanowarstwowe powłoki antyrefleksyjne.

W Polsce obserwuje się rosnące zapotrzebowanie na materiały specjalistyczne wykorzystywane w planowanych inwestycjach w offshore. Krajowe firmy kompozytowe nie produkują włókien węglowych ani prepregów, co stawia przemysł w zależności importowej. Natomiast stale rozwijany jest segment powłok ochronnych, w tym powłok antykorozyjnych i powłok redukujących osadzanie się zanieczyszczeń. Badania AGH oraz Politechniki Śląskiej obejmują powłoki hybrydowe o strukturze wielowarstwowej, które mogą znaleźć zastosowanie w konstrukcjach offshore i elementach elektrowni wiatrowych.

Transformacja energetyczna obejmuje także rozwój technologii magazynowania energii, gdzie kluczowe są materiały elektrodowe o wysokiej pojemności, membrany polimerowe, separatory, powłoki anionoselektywne oraz zaawansowane elektrolity. Polska jest światowym liderem produkcji baterii litowo-jonowych, jednak wciąż nie wytwarza materiałów elektrodowych, co stanowi ryzyko strategiczne. Zaawansowane materiały stanowią fundament dla budowy krajowej niezależności technologicznej w tym obszarze.

Transport i elektromobilność

Transport, szczególnie w kontekście elektromobilności, jest drugim najważniejszym odbiorcą zaawansowanych materiałów. Lekkość konstrukcji, odporność na korozję, redukcja masy i możliwość integracji z elektroniką to podstawowe wymagania współczesnego przemysłu. Kompozyty, powłoki antykorozyjne, materiały tłumiące drgania oraz materiały EMI shielding wykorzystywane są w pojazdach elektrycznych, autobusach wodorowych oraz kolejnictwie.

Polska jest znaczącym producentem autobusów elektrycznych i wodorowych. Solaris Bus & Coach oraz Autosan stosują materiały kompozytowe w elementach nadwozia, osłonach akumulatorów, strukturach nośnych oraz komponentach wewnętrznych. To zwiększa popyt na kompozyty polimerowe, włókna szklane, materiały węglowe, materiały pochłaniające energię oraz elementy drukowane addytywnie. Jednocześnie rozwój infrastruktury ładowania i elektroniki mocy wymaga powłok przewodzących, materiałów odpornych na wysoką temperaturę, laminatów PCB o wysokiej czystości oraz komponentów miedzianych o specjalnych parametrach.

Na świecie obserwuje się wyraźne przejście do materiałów wysokowydajnych. Korea Południowa rozwija ultrastrukturalne polimery dla motoryzacji, Japonia i USA inwestują w wysokowytrzymałe nanokompozyty metaliczne (MMC – metal–matrix composites), a Niemcy prowadzą zintegrowane programy Materials 2030 obejmujące redukcję masy pojazdów przy zachowaniu właściwości mechanicznych. Polska, mimo posiadania licznych ośrodków badawczych, nie prowadzi krajowego programu materiałów dla elektromobilności, co oznacza przewagę konkurencyjną dla innych krajów, które już rozwijają pełne łańcuchy dostaw.

Budownictwo, infrastruktura i materiały konstrukcyjne

Zaawansowane materiały zmieniają także sektor budownictwa i infrastruktury. Kompozyty wzmacniające konstrukcje, powłoki ochronne, materiały o zwiększonej odporności ogniowej, inteligentne barwniki termochromowe oraz materiały izolacyjne o niskiej przewodności cieplnej stają się standardem w nowoczesnych projektach. Aerożele, nanocząstki krzemionki,

nanowłókna celulozowe czy powłoki barierowe wykorzystywane są w izolacjach oraz materiałach wykończeniowych.

W Polsce obserwuje się rosnące zainteresowanie materiałami powłokowymi, takimi jak powłoki antygraffiti, powłoki antykorozyjne, powłoki z funkcją samooczyszczania oraz farby z dodatkiem nanocząstek. Firmy chemiczne rozwijają produkty zawierające nanocząstki TiO_2 , ZnO oraz Al_2O_3 , podnoszące trwałość i odporność na warunki atmosferyczne. Polski sektor chemiczny, obejmujący duże spółki, ma potencjał rozwoju materiałów funkcjonalnych, lecz nie istnieje program państwowy wspierający ich komercjalizację.

Elektronika, sensory, fotonika i komponenty high-tech

Zaawansowane materiały są niezbędne dla rozwoju nowoczesnej elektroniki i fotoniki. Materiały przewodzące, pasty srebrne i miedziane, warstwy dielektryczne, laminaty PCB, przewodzące nanotusze, materiałowe platformy sensorowe, powłoki transparentne przewodzące oraz materiały absorbujące światło sprawiają, że elektronika może osiągać większą wydajność, miniaturyzację i odporność na zakłócenia.

W Polsce jednym z najbardziej znanych przykładów przełomowej technologii jest XTPL, który opracował nanotusze przewodzące umożliwiające drukowanie ścieżek o bardzo wysokiej rozdzielczości. Technologia ta znalazła zastosowanie w Chinach, Korei Południowej, Japonii i Niemczech. Jest to dowód, że polskie laboratoria mogą tworzyć materiały porównywalne z najlepszymi światowymi rozwiązaniami.

Jednocześnie uczelnie takie jak Politechnika Wrocławska, Politechnika Warszawska i AGH opracowują nanowarstwy, nanosensory oraz cienkowarstwowe materiały przewodzące dla elektroniki, w tym warstwy bazujące na graficie, grafenie i nanorurkach węglowych. W porównaniu do krajów takich jak Korea czy Japonia, Polska nie posiada jednak rozwiniętej infrastruktury przemysłowej umożliwiającej skalowanie takich materiałów do produkcji masowej.

Ochrona środowiska i gospodarka wodna

Nanomateriały środowiskowe należą do najbardziej perspektywicznych obszarów. Polska ma bardzo silny potencjał badawczy w zakresie fotokatalizy, nanoadsorpcji i remediacji. Zastosowania obejmują oczyszczanie wód powierzchniowych, usuwanie pestycydów, redukcję toksycznych jonów metali, rozkład lotnych związków organicznych, biodegradację związków farmaceutycznych oraz poprawę parametrów wody pitnej.

W jednostkach PAN i uczelniach technicznych rozwijane są materiały takie jak nanocząstki tlenku żelaza (Fe_3O_4), nanokompozyty magnetyczne grafen-Fe, materiały TiO_2 modyfikowane domieszkami azotu, siarki i węgla, nanowłókna polimerowe do filtrów powietrza, materiały porowate do adsorpcji fenoli, a także kompozyty hybrydowe do usuwania ropopochodnych. Te rozwiązania mają potencjał eksportowy, ale wymagają standaryzacji i certyfikacji zgodnych z regulacjami UE.

Rolnictwo precyzyjne i żywność

Materiałoznawstwo w rolnictwie obejmuje nanonawozy, nanoformulacje mikroelementów, nanosensory glebowe, nawozy kontrolowanego uwalniania, nanoopakowania żywności, materiały antybakteryjne oraz dodatki zapewniające stabilność produktów spożywczych. Polska posiada udokumentowane patenty dotyczące nano-ZnO w żywieniu zwierząt oraz rozwinięte kompetencje w nanosensorach środowiskowych.

W krajach takich jak Holandia czy Izrael rozwój nanoagro jest włączony w strategię bezpieczeństwa żywnościowego. W Polsce ten segment rozwija się dynamicznie, lecz również bez wsparcia politycznego, co powoduje, że rozwiązania trafiają na rynek wolniej niż mogłyby.

Struktura polskiego ekosystemu materiałów zaawansowanych, jednostki naukowe, potencjał patentowy i analiza porównawcza łańcuchów wartości 2025–2035

Materiały zaawansowane należą do tych obszarów technologicznych, w których przewaga konkurencyjna nie wynika wyłącznie z liczby naukowców czy laboratoriów, ale z dojrzałości całego ekosystemu. W krajach takich jak Niemcy, Korea Południowa czy Japonia istnieją rozbudowane platformy współpracy, programy publiczne, centra testowe, parki technologiczne i przedsiębiorstwa, które wspólnie tworzą płynny mechanizm rozwoju i komercjalizacji. Polska dysponuje znaczącym potencjałem naukowym, lecz brakuje jej zintegrowanego systemu, który umożliwiałby przechodzenie technologii z poziomu laboratoryjnego TRL 3–4 do praktycznego poziomu TRL 7–9.

Jednostki naukowe i centra badawcze w Polsce

Poniżej przedstawiono syntetyczne zestawienie najważniejszych jednostek naukowych rozwijających zaawansowane materiały i nanotechnologie. Zestawienie to obejmuje instytuty PAN, uczelnie techniczne, centra kompetencji oraz laboratoria wyspecjalizowane w syntezie, charakterystyce i testowaniu materiałów.

Tabela 3 Najważniejsze jednostki badawcze w Polsce prowadzące badania nad materiałami zaawansowanymi

Instytucja	Specjalizacja materiałowa	Komentarz
Instytut Chemii Fizycznej PAN	nanomateriały funkcjonalne, kataliza, cienkie warstwy	jedna z największych jednostek w PL w chemii materiałowej
Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN	kataliza, materiały hybrydowe, nanostruktury	wysoki poziom publikacji i projektów europejskich
Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN	materiały metaliczne, biomateriały	kluczowa rola w materiałach konstrukcyjnych i medtech
Instytut Fizyki PAN	materiały dla elektroniki i fotoniki	rozwój materiałów cienkowarstwowych i sensorów

Politechnika Śląska (Wydz. Mechaniczny, Wydz. Chemiczny)	kompozyty, powłoki funkcjonalne, inżynieria powierzchni	silny potencjał wdrożeniowy w przemyśle
Politechnika Wrocławska	grafen, nanowarstwy, przewodzące materiały drukowane	współpraca globalna w materiałach elektronicznych
AGH	metalurgia, ceramika, materiały wysokowytrzymałe	największy potencjał materiałowy w Polsce
Politechnika Warszawska	techniki addytywne, kompozyty, nanowłókna	wiodący ośrodek w materiałach polimerowych
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny	materiały środowiskowe i remediacyjne	unikatowe kompetencje fotokatalityczne
Łukasiewicz – IMN	materiały metaliczne dla przemysłu	prace aplikacyjne na wysokich TRL
Łukasiewicz – ICSO	materiały chemiczne, polimery	silna baza technologiczna dla przemysłu chemicznego
Łukasiewicz – PORT	nanotechnologie, biotechnologie, materiały funkcjonalne	centrum o standardzie międzynarodowym

Polska posiada ponad 40 uczelni i instytutów prowadzących badania materiałowe. Najsilniejsze kompetencje to kompozyty, materiały funkcjonalne, powłoki cienkowarstwowe i nanomateriały środowiskowe. Na tle UE wyróżniamy się wysoką aktywnością naukową i dobrym sprzętem badawczym (mikroskopia, spektroskopia, XRD, SEM/TEM), jednak brakuje laboratoriów certyfikacyjnych zgodnych z najbardziej wymagającymi normami OECD oraz unijnymi standardami REACH dla nanomateriałów.

Potencjał patentowy i aktywność komercjalizacyjna

Ocena polskiego potencjału materiałowego wymaga analizy aktywności patentowej. W bazach EPO i WIPO obserwuje się regularny przyrost zgłoszeń dotyczących:

- nanokompozytów polimerowych,
- nano-Ag, nano-Cu i nano-ZnO jako dodatków funkcjonalnych,
- powłok przewodzących i nadruków hybrydowych,
- nanomateriałów środowiskowych do remediacji,
- materiałów dla fotoniki i elektroniki,
- materiałów do opakowań inteligentnych,
- nanoformulacji agro i paszowych.

Jedną z kluczowych obserwacji jest to, że najszybciej rośnie segment patentów dotyczących powłok funkcjonalnych i materiałów odpornościowych. Wynika to z dużego zapotrzebowania rynkowego oraz niższych barier regulacyjnych niż w przypadku materiałów medycznych czy żywnościowych.

W porównaniu z Niemcami Polska generuje mniej zgłoszeń patentowych, lecz charakteryzuje się wysokim poziomem jakościowym — wiele projektów jest publikowanych w renomowanych czasopismach naukowych i współfinansowanych przez Horyzont Europa.

Porównanie polskiego łańcucha wartości z wybranymi krajami

W krajach wiodących struktura łańcucha wartości jest kompletna. Obejmuje syntezę materiałów, ich przetwarzanie, produkcję urządzeń testowych, certyfikację, masową produkcję, integrację i eksport. Polska posiada silny segment syntezy i charakterystyki, lecz słabo rozwinięte są segmenty certyfikacji i skalowania.

Tabela 4 Porównanie łańcucha wartości zaawansowanych materiałów

Element łańcucha	Polska	Niemcy	Korea Płd.	Holandia
Synteza i badania podstawowe	bardzo silne	silne	bardzo silne	silne
Charakterystyka	rozwinięta	bardzo rozwinięta	bardzo rozwinięta	rozwinięta
Nanofabrykacja	ograniczona	rozwinięta	bardzo rozwinięta	rozwinięta
Testowanie i certyfikacja	słabe	bardzo rozwinięte	bardzo rozwinięte	rozwinięte
Pilotaże TRL 6–8	ograniczone	rozwinięte	bardzo rozwinięte	rozwinięte
Produkcja przemysłowa	ograniczona	bardzo rozwinięta	bardzo rozwinięta	rozwinięta
Eksport materiałów	niski	wysoki	bardzo wysoki	wysoki

Porównanie to jasno pokazuje, że Polska ma potencjał, lecz brakuje jej systemowych działań zdolnych do stworzenia pełnego ekosystemu materiałowego. W Europie podobnym krajem do Polski jest Portugalia, która również posiada silną bazę naukową, ale ograniczoną przemysłową skalę produkcji.

Struktura popytu i przyszłe kierunki rozwoju do 2035 r.

Przyszłość materiałów zaawansowanych zależy od popytu w sektorach przemysłowych. Analiza globalnych trendów przemysłowych wskazuje, że największe zapotrzebowanie w latach 2025–2035 dotyczyć będzie:

- materiałów dla półprzewodników,
- materiałów elektrodowych do baterii litowo-jonowych i sodowych,
- kompozytów wysokowytrzymałych,
- materiałów środowiskowych (membrany, filtry, sorbenty),
- inteligentnych opakowań i powłok aktywnych,
- materiałów dla infrastruktury niskoemisyjnej,
- materiałów dla fotoniki i sensorów,
- materiałów drukowanych 3D,
- nanoagro i materiałów dla żywności,
- materiałów magnetycznych dla elektroniki mocy.

Polska może realnie zdobyć przewagę konkurencyjną w czterech z tych dziedzin: materiałach środowiskowych, materiałach funkcjonalnych, kompozytach hybrydowych oraz nanoagro.

Sektory elektroniki i półprzewodników wymagają inwestycji infrastrukturalnych i przemysłowych, które obecnie nie istnieją w skali wystarczającej do obsługi rynków globalnych.

Segmentacja polskiego rynku materiałów zaawansowanych do 2035 r.

Poniższa tabela przedstawia syntetyczną segmentację przyszłego polskiego rynku materiałów zaawansowanych.

Tabela 5 Prognozowana segmentacja polskiego rynku materiałów zaawansowanych

Segment	Dynamika 2025–2035	Potencjał eksportowy	Bariery
Materiały środowiskowe	bardzo wysoka	wysoki	certyfikacja, regulacje UE
Kompozyty i materiały hybrydowe	wysoka	średni	uzależnienie od importu włókien
Materiały funkcjonalne	bardzo wysoka	wysoki	testy bezpieczeństwa
Materiały elektroniczne	średnio-wysoka	wysoki	brak dużych fabryk
Nanoagro i materiały żywnościowe	wysoka	wysoki	regulacje bezpieczeństwa
Biomateriały	umiarkowana	średni	bariery kliniczne
Materiały 3D i materiały addytywne	wysoka	średni	koszty wejścia

Z analizy wynika, że Polska powinna skoncentrować się na segmentach, w których jej kompetencje badawcze są największe, bariery wejścia umiarkowane, a popyt międzynarodowy rośnie szybciej niż średnia. Najwięcej synergii Polska może osiągnąć w sektorach środowiskowych, kompozytowych i agro-nano, ponieważ wymagają kombinacji kompetencji chemicznych, materiałowych, biologicznych i inżynierskich – obszarów, w których krajowa nauka jest szczególnie silna.

2.9. Podsumowanie

Zaawansowane materiały stanowią jeden z najbardziej perspektywicznych i strategicznych obszarów technologicznych dla polskiej gospodarki. Polska posiada wybitne kompetencje naukowe, liczne laboratoria i aktywne firmy rozwijające innowacyjne materiały, jednak brakuje jej spójnego systemu wspierającego przejście od badań do komercjalizacji. W porównaniu do krajów liderów Polska ma potencjał dorównania im w obszarach ochrony środowiska, materiałów funkcjonalnych i nanoagro, lecz konieczne jest uruchomienie programów krajowych, infrastruktury testowej oraz wsparcia przemysłowego w zakresie TRL 6–9.

Rozwój materiałów zaawansowanych w Polsce powinien być traktowany jako fundament transformacji energetycznej, cyfrowej, przemysłowej i środowiskowej. Odpowiednio zaprojektowana polityka publiczna mogłaby przekształcić Polskę z kraju o wysokiej aktywności naukowej w kraj o znaczącej pozycji przemysłowej w Europie.

ROZDZIAŁ 3 – Zastosowania nanotechnologii w Polsce: kluczowe sektory, trendy rynkowe, dynamika technologiczna i potencjał wzrostu

Nanotechnologie znajdują dziś zastosowanie w coraz szerszym spektrum sektorów polskiej gospodarki, a ich rola rośnie zarówno w obszarach przemysłowych, jak i społecznych, środowiskowych czy infrastrukturalnych. Współczesny trend rozwojowy wskazuje, że nanomateriały stanowią nie tylko nową klasę produktów, ale przede wszystkim platformę umożliwiającą tworzenie przełomowych technologii: inteligentnych powłok, produktów środowiskowych, zaawansowanych systemów rolniczych, efektywnych energetycznie instalacji czy narzędzi medycznych i diagnostycznych. Transformacja ta jest szczególnie widoczna w Polsce, gdzie ekosystem naukowy i przemysłowy rozwija się dynamicznie, a krajowe jednostki badawcze współtworzą globalny dorobek w dziedzinie materiałów funkcjonalnych oraz nanoaplikacji środowiskowych i rolniczych.

Równocześnie sektor nano w Polsce obejmuje szeroki zakres TRL — od badań podstawowych prowadzonych na uczelniach i w instytutach PAN, po projekty wdrożeniowe realizowane przez przedsiębiorstwa z branży chemicznej, inżynierii powierzchni, ochrony środowiska, energetyki czy medtech. W ostatnich latach wzrosło również zainteresowanie nanotechnologią w sektorach nietradycyjnych, takich jak infrastruktura, kosmetologia, logistyka czy produkty konsumenckie. Zmieniające się regulacje UE — szczególnie w zakresie środowiska, zdrowia, emisji i jakości produktów — dodatkowo zwiększają zapotrzebowanie na materiały o wysokiej funkcjonalności.

3.1. Energetyka: rosnące znaczenie materiałów funkcjonalnych i powłok ochronnych

Nanotechnologia w energetyce w Polsce pełni funkcję platformy wzmacniającej efektywność energetyczną, trwałość infrastruktury oraz transformację w kierunku zeroemisyjności. W obszarze energetyki konwencjonalnej największe znaczenie mają powłoki ochronne stosowane na elementach turbin, wymiennikach ciepła, instalacjach przesyłowych oraz komponentach narażonych na korozję, erozję czy wysokie temperatury. Polskie uczelnie techniczne, w tym AGH i Politechnika Śląska, prowadzą od lat projekty związane z ceramiką funkcjonalną, nanopowłokami termoodpornymi, dyspersjami nanometali oraz kompozytami metalicznymi przeznaczonymi do zastosowań w trudnych warunkach środowiskowych.

W energetyce odnawialnej nanomateriały wzmacniają osłony turbin wiatrowych, poprawiają własności kompozytów wykorzystywanych w łopatach oraz zapewniają ochronę przed degradacją UV i zanieczyszczeniami. W fotowoltaice stosuje się nanowarstwy podnoszące przewodność i trwałość ogniw, a także powłoki samooczyszczające, które ograniczają straty efektywności. Coraz większą rolę odgrywa drukowana elektronika, stosowana do tworzenia elastycznych modułów PV czy sensorów monitorujących pracę instalacji.

W obszarze magazynowania energii nanomateriały stosowane są jako wzmocnienia elektrod i separatorów, co zwiększa pojemność baterii, ich stabilność i odporność na cykle ładowania. Na świecie dynamicznie rośnie wykorzystanie nanostruktur w superkondensatorach oraz magazynach przepływowych, a Polska — dzięki silnemu środowisku naukowemu — posiada

kompetencje, które mogą zostać wykorzystane do rozwoju takich technologii w sektorze przemysłowym.

3.2. Ochrona środowiska: fotokataliza, nanoadsorbenty i systemy remediacyjne

Sektor środowiskowy jest jednym z kluczowych obszarów, w których nanotechnologie wykazują najwyższy potencjał wdrożeniowy w Polsce. Wiele technologii opracowanych na polskich uczelniach ma charakter aplikacyjny — nadają się do integracji z infrastrukturą miejską, przemysłową lub z systemami oczyszczania powietrza i wody.

Fotokataliza oparta na nanocząstkach tlenku tytanu, nanowarstwy TiO_2 modyfikowane metalami oraz hybrydowe struktury $\text{TiO}_2/\text{graphene}$ są już stosowane w Polsce w przestrzeni publicznej, przemyśle cementowym, branży budowlanej i w systemach oczyszczania powietrza. Nanoadsorbenty oparte na tlenkach żelaza, manganianach, cerach i kompozytach organiczno-nieorganicznych są wykorzystywane w usuwaniu metali ciężkich, mikroplastiku, farmaceutyków oraz azotanów z wód powierzchniowych i podziemnych. Rozwój nanomateriałów magnetycznych umożliwia łatwe oddzielanie zanieczyszczeń za pomocą pola magnetycznego, co czyni te technologie szczególnie atrakcyjnymi w sektorze wodno-kanalizacyjnym.

Nanomateriały środowiskowe opracowywane w Polsce obejmują również membrany do filtracji wody, nanokompozyty biodegradowalne, materiały o właściwościach antybakteryjnych oraz powłoki antysmogowe. Wdrożenia komercyjne obejmują m.in. produkty dla infrastruktury miejskiej, powłoki elewacyjne, systemy neutralizacji LZO, a także elementy pasywnej ochrony powietrza w budynkach publicznych.

3.3. Rolnictwo i produkcja żywności: nanoformulacje nawozów, nanosensory i materiały aktywne

W rolnictwie zastosowania nanotechnologii rozwijają się w Polsce wyjątkowo dynamicznie, co wynika z rosnących wymogów dotyczących zrównoważonego stosowania nawozów, poprawy jakości gleby, redukcji środków ochrony roślin oraz potrzeby monitoringu parametrów środowiskowych. Nano-ZnO, opisane w dostarczonym raporcie, stanowi jedno z najbardziej zaawansowanych technologicznie rozwiązań rozwijanych w Polsce, a badania prowadzone m.in. na ZUT i Uniwersytecie Rolniczym wskazują na jego wysoką efektywność.

Nanoformulacje nawozów poprawiają przyswajalność składników odżywczych, zmniejszają straty nawozowe i ograniczają skażenie środowiska. Nanokompozyty polimerowe stosowane w opakowaniach żywności wydłużają jej trwałość, chronią przed utlenianiem oraz posiadają właściwości antybakteryjne. Rozwijane nanosensory umożliwiają monitorowanie stanu gleby, wilgotności, zawartości jonów, a nawet obecności patogenów w czasie rzeczywistym.

Rolnictwo precyzyjne wykorzystuje również drony z czujnikami nano, które pozwalają na inwentaryzację upraw i wczesne wykrywanie stresów roślinnych. Polska dzięki silnym kompetencjom naukowym jest w stanie rozwijać te technologie w kierunku komercjalizacji.

3.4. Kierunki technologiczne dominujące w Polsce

Na podstawie analizy działalności przedsiębiorstw, raportów i projektów badawczych można wskazać kluczowe kierunki technologiczne rozwijane w Polsce.

Nanomateriały metaliczne i tlenkowe. Polska posiada silne zaplecze w syntezie nano-Ag, nano-Cu, nano-ZnO, nano-TiO₂ oraz nanowypełniaczy polimerowych. Firmy takie jak Nano-Tech Polska i Smart Nanotechnologies rozwijają produkty stosowane w powłokach, dezynfekcji, rolnictwie i chemii gospodarczej.

Materiały węglowe. Technologia CNT, grafenu i nanorurek jest rozwijana przez Politechnikę Wrocławską oraz ośrodki PAN. Komercjalizacja grafenu wciąż pozostaje ograniczona, ale kompetencje badawcze są wysokie.

Powłoki funkcjonalne. To jeden z najaktywniejszych segmentów komercyjnych. Powłoki antybakteryjne, samooczyszczające, fotokatalityczne i antykorozyjne oparte na nanostrukturach znajdują zastosowanie w budownictwie, przemyśle i branży medycznej.

Nanosensory i elementy elektroniczne. Dynamicznie rozwijany jest segment nanosensorów środowiskowych i glebowych, który wpisuje się w globalny trend rolnictwa precyzyjnego. Ważną rolę odgrywają materiały drukowane i nanotusze przewodzące.

Materiały środowiskowe. Polska wyróżnia się pod względem badań nad nanoadsorbentami, kompozytami magnetycznymi i fotokatalizatorami. Ten kierunek ma duży potencjał eksportowy, szczególnie przy zaostrzających się regulacjach środowiskowych UE.

Nanoagro i materiały dla żywności. Polska posiada patentowane rozwiązania w zakresie nano-ZnO dla pasz i nawozów. Jest to segment bardzo obiecujący biznesowo.

3.5. Trendy rynkowe napędzające polską nanotechnologię

Nanotechnologia rozwija się równolegle do transformacji przemysłowej. Poniżej przedstawiono kluczowe trendy mające wpływ na polski rynek.

Digitalizacja materiałów i rozwój AI w projektowaniu nanostruktur. Informatyka materiałowa staje się fundamentem tworzenia nowych materiałów. Polska dopiero rozpoczyna wdrażanie takich narzędzi, co może być zarówno barierą, jak i szansą.

Zielone technologie i dekarbonizacja. Zapotrzebowanie na materiały środowiskowe, membrany, katalizatory i powłoki rośnie wraz z wymogami UE w zakresie jakości powietrza, wody oraz obiegu zamkniętego.

Rozwój półprzewodników w Europie. Inwestycje w europejski rynek chipów zwiększają popyt na materiały cienkowarstwowe, pasty i chemikalia procesowe. Polska może znaleźć tu niszę, choć konkurencja jest duża.

Transformacja rolnictwa i żywności. Rosnące koszty nawozów, wymogi środowiskowe i potrzeba stabilizacji produkcji żywności zwiększają zainteresowanie nanoagro.

Infrastruktura niskoemisyjna. W budownictwie rośnie zapotrzebowanie na powłoki, izolacje i dodatki funkcjonalne o właściwościach antybakteryjnych i antykorozyjnych.

3.6. Porównanie Polski z krajami wiodącymi w nanotechnologiach

Pozycja polskiego rynku jest zróżnicowana w zależności od segmentu. W syntezie nanomateriałów Polska jest blisko średniej europejskiej. W powłokach i materiałach środowiskowych jesteśmy powyżej średniej, natomiast w materiałach dla elektroniki i procesach litograficznych pozostajemy daleko za krajami wiodącymi.

Tabela 6 Porównanie pozycji rynku nanotechnologii

Segment	Polska	Europa Zachodnia	USA	Korea Płd.	Japonia
Nanomateriały metaliczne	średnio silna	silna	bardzo silna	silna	silna
Powłoki funkcjonalne	silna	silna	silna	średnia	silna
Nanosensory	średnia	wysoka	bardzo wysoka	bardzo wysoka	wysoka
Materiały elektroniczne	słaba	bardzo wysoka	bardzo wysoka	bardzo wysoka	bardzo wysoka
Materiały środowiskowe	silna	średnia	średnia	średnia	średnia
Nanoagro	średnio-silna	średnia	niska	średnia	średnia
Nanomedycyna	słaba	silna	silna	silna	bardzo silna

Z analizy wynika, że Polska może szybko awansować w segmentach środowiskowych, kompozytowych i agro-nano, natomiast duże inwestycje byłyby konieczne w elektronice.

3.7. Główne bariery rozwoju polskiej nanotechnologii

- Skonsolidowanie rynku napotyka kilka kluczowych barier.
- Brak krajowej strategii. Polska nie posiada dokumentu odpowiadającego Materials 2030 w Niemczech lub Materials 4.0 w Korei.
- Brak infrastruktury testowej. Nanotechnologie wymagają zaawansowanych testów bezpieczeństwa, toksykologii i certyfikacji.
- Niska skala produkcji. Małe firmy nie są w stanie konkurować z globalnymi producentami.
- Fragmentacja ekosystemu. Ośrodki badawcze pracują niezależnie, a współpraca nauka-biznes jest niewystarczająca.
- Niedobór specjalistów od komercjalizacji. Polska posiada silnych naukowców, lecz mało menedżerów potrafiących wprowadzać materiały na rynek.

3.8. Szanse i przewagi konkurencyjne

- Mimo barier Polska posiada unikalne zasoby, które mogą stać się podstawą rozwoju.

- Silny potencjał akademicki. Polska ma jedną z największych baz naukowych w Europie Środkowej.
- Dynamiczne firmy nano. Spółki z sektora chemii drobnocząsteczkowej i materiałowej szybko rosną.
- Rola UE. Polskie podmioty korzystają z Horyzontu Europa i programów regionalnych, co zwiększa dostęp do finansowania.
- Wzrost popytu w rolnictwie i środowisku. Te dwa sektory stanowią naturalny rynek zbytu dla polskich technologii nano.

3.9. Podsumowanie

Polski rynek nanotechnologii ma charakter rosnący, choć wciąż nieukształtowany. Oferuje ogromny potencjał w nanomateriałach metalicznych, powłokach funkcjonalnych, materiałach środowiskowych i nanoagro. Polska znajduje się w fazie dynamicznego wzrostu, a jej potencjał naukowy może zostać przekuty w konkurencyjne rozwiązania przemysłowe pod warunkiem zapewnienia wsparcia infrastrukturalnego, strategicznego i instytucjonalnego. Rozwój nanotechnologii powinien być traktowany jako element transformacji przemysłowej, energetycznej i środowiskowej kraju.

Z analizy wynika, że Polska może szybko awansować w segmentach środowiskowych, kompozytowych i agro-nano, natomiast duże inwestycje byłyby konieczne w elektronice.

Sektor	Zakres zastosowań	Dynamika popytu
Energetyka	kompozyty, powłoki, materiały odpornościowe	wysoka
Elektronika	pasty, warstwy, nanotusze	bardzo wysoka
Budownictwo	powłoki i dodatki funkcjonalne	wysoka
Rolnictwo	nanonawozy i nanosensory	bardzo wysoka
Medycyna	biomateriały	umiarkowana
Środowisko	membrany, nanoadsorbenty	bardzo wysoka

ROZDZIAŁ 4 – Ekosystem naukowy i biznesowy w Polsce: jednostki wiodące, infrastruktura, kompetencje oraz potencjał komercjalizacyjny

Polski ekosystem nanotechnologii jest złożony, wielowarstwowy i obejmuje dziesiątki instytucji naukowych, setki zespołów badawczych oraz rosnącą liczbę firm, zarówno start-upów, jak i przedsiębiorstw o ugruntowanej pozycji. Jego rozwój jest wynikiem synergii między tradycją polskiej chemii i materiałoznawstwa a nowoczesnymi kierunkami badań obejmującymi inżynierię powierzchni, nanobiotechnologię, fotonikę, nanoagro, technologie środowiskowe oraz drukowaną elektronikę.

4.1. Polskie jednostki naukowe jako fundament rozwoju

Polska posiada jedną z największych sieci laboratoriów nanotechnologicznych w Europie Środkowej. Instytuty PAN, w tym IChF PAN, IPC PAS, IF PAN czy ICSO oraz jednostki Sieci Łukasiewicz prowadzą badania nad syntezą nanomateriałów, ich charakterystyką, powłokami cienkowarstwowymi, materiałami hybrydowymi i kompozytami. Politechnika Śląska, AGH, Politechnika Warszawska, Politechnika Gdańska, ZUT, Uniwersytet Warszawski i Uniwersytet Jagielloński należą do wiodących jednostek prowadzących badania w obszarze inżynierii powierzchni, fotokatalizy, nanostruktur metalicznych i nanoformulacji nawozowych.

Badania polskich naukowców są często cytowane na świecie, a część jednostek należy do międzynarodowych konsorcjów związanych z materiałami inteligentnymi, sensorami oraz technologiami środowiskowymi. Polska nauka dysponuje bardzo wysokim poziomem kompetencji w zakresie syntezy materiałów nieorganicznych, nanokompozytów i struktur funkcjonalnych.

4.2. Infrastruktura laboratoryjna i aparaturowa

Polska dysponuje rozbudowaną aparaturą badawczą, w tym mikroskopami SEM, TEM, AFM, spektrometrią powierzchniową, urządzeniami do syntezy chemicznej i fizycznej oraz zaawansowanymi systemami analitycznymi. Infrastruktura jest jednak rozproszona i brakuje jednego centrum referencyjnego pełniącego funkcję standardu krajowego.

W obszarze nano brakuje laboratoriów zgodnych z OECD, szczególnie w zakresie toksykologii, ekotoksykologii oraz certyfikacji materiałów. To jeden z najważniejszych braków ekosystemu.

4.3. Ekosystem firm: chemia, materiały, technologie środowiskowe i elektronika

Polska ma dynamicznie rosnący sektor przedsiębiorstw w obszarze nano. Obejmuje on:

- firmy chemiczne wytwarzające nanomateriały,
- technologie powłok funkcjonalnych,
- nanoagro,
- rozwiązania środowiskowe,
- drukowaną elektronikę,

- materiały kompozytowe,
- nanometale.

Najbardziej zaawansowany technologicznie sektor stanowi elektronika drukowana. XTPL, działająca globalnie, jest jednym z nielicznych polskich przedsiębiorstw, które wytworzyły technologię o światowym znaczeniu. W branży powłok funkcjonalnych działa wiele firm, które rozwijają produkty na rynek budowlany, medyczny i przemysłowy

Nanoagro obejmuje firmy produkujące nanoformulacje nawozowe i biostymulatory. Technologie środowiskowe, w tym fotokataliza i filtry powietrza, są oferowane zarówno przez start-upy, jak i podmioty dojrzałe

4.4. Współpraca nauka–biznes: ograniczenia i potrzeby

Największym ograniczeniem jest brak integracji nauki i przemysłu. W Polsce współpraca jest zbyt słaba, a wiele wyników badań nie trafia do wdrożeń. Barrierami są:

- brak centrów pilotażowych,
- brak laboratoriów certyfikacyjnych,
- wysokie koszty skalowania,
- brak wieloletnich programów badawczo-wdrożeniowych.

Potrzebne są platformy wspólne, podobne do Fraunhofera, TNO czy instytutów japońskich.

4.5. Trendy rozwojowe w Polsce: perspektywa 2035

Przewiduje się, że do 2035 roku polski rynek nanotechnologii i materiałów zaawansowanych będzie oparty na kilku kluczowych filarach.

- Rosnąca liczba firm produkujących powłoki i nanomateriały.
- Dynamiczny rozwój materiałów środowiskowych i agro-nano.
- Wzrost eksportu specjalistycznych materiałów.
- Rozwój materiałoznawstwa pod wpływem europejskiej strategii materiałowej.
- Stopniowe zwiększanie zdolności produkcyjnych w elektronice drukowanej.
- Rosnąca rola sztucznej inteligencji w projektowaniu materiałów.

Polskim wyzwaniem pozostanie przejście z TRL 3–6 do TRL 7–9. Największa luka dotyczy zdolności certyfikacyjnych, pilotażowych i skalowania.

4.6. Trendy naukowe i badawcze w polskich jednostkach

W polskich instytutach PAN i uczelniach widoczne są następujące kierunki badań:

- materiały hybrydowe o strukturze wielowarstwowej,
- powłoki aktywne UV,
- nanokompozyty magnetyczne,

- materiały elektrochemiczne dla baterii,
- nanoemulsje i nanoformulacje,
- materiały dla fotoniki,
- synteza materiałów katalitycznych,
- biomateriały.

Jednostki takie jak IChF PAN, AGH i Politechnika Śląska są szczególnie aktywne w obszarach materiałów funkcjonalnych i środowiskowych.

4.7. Analiza konkurencyjna Polski względem krajów wiodących

Polska może wzmocnić swoją pozycję w sektorach kompozytów, materiałów środowiskowych i nanoagro. Kraje takie jak Korea Południowa mają przewagę w półprzewodnikach, USA w nanomateriałach węglowych, Japonia w materiałach magnetycznych, a Niemcy w infrastrukturze pilotażowej.

Polska wyróżnia się natomiast silną bazą badawczą i potencjałem firm nanospecjalistycznych.

4.8. Rekomendacje strategiczne dla Polski do 2035 roku

- Utworzenie krajowej strategii materiałowej.
- Budowa centrów pilotażowych i certyfikacyjnych.
- Wsparcie dla biznesu w obszarach o wysokiej dynamice rynku.
- Integracja nauki i przemysłu poprzez programy partnerstw.
- Rozwój materiałoznawstwa cyfrowego.
- Budowa łańcuchów dostaw dla agro-nano i materiałów środowiskowych.

4.9. Podsumowanie

Rynek nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce będzie rozwijał się w sposób zdecydowanie szybszy niż większość sektorów technologicznych, o ile zostaną podjęte działania strategiczne. Główną przewagą kraju jest potencjał naukowy oraz kompetencje w nanomateriałach metalicznych, powłokach, materiałach środowiskowych i agro-nano. Największe szanse rozwoju dotyczą segmentów powiązanych z trendami globalnymi: ochroną środowiska, rolnictwem precyzyjnym, energetyką oraz elektroniką drukowaną.

ROZDZIAŁ 5 - Zastosowania nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w sektorach gospodarki w Polsce oraz ich przyszły potencjał

Nanotechnologia i materiały zaawansowane stanowią podstawę nowoczesnych technologii stosowanych we wszystkich kluczowych sektorach gospodarki. Zastosowania te determinują zarówno tempo rozwoju poszczególnych branż, jak i możliwości transformacji energetycznej, cyfrowej oraz środowiskowej. W Polsce rośnie zapotrzebowanie na rozwiązania nano we wszystkich kluczowych segmentach, od energetyki i transportu po medycynę, przemysł spożywczy i zaawansowaną produkcję.

W niniejszym rozdziale przedstawiono pogłębioną analizę zastosowań nanotechnologii w polskiej gospodarce, ich obecne wdrożenia, stopień zaawansowania technologicznego oraz ocenę potencjału do roku 2035. Zestawiono również porównania międzynarodowe, wskazano luki i bariery oraz przedstawiono modele rozwoju właściwe dla poszczególnych sektorów.

5.1. Energetyka i technologie niskoemisyjne

Energetyka jest jednym z najsilniejszych odbiorców nanotechnologii. Wraz ze wzrostem udziału odnawialnych źródeł energii rośnie zapotrzebowanie na materiały o wyższej trwałości, odporności środowiskowej i parametrach przewyższających rozwiązania konwencjonalne.

Najważniejsze obszary zastosowań nanotechnologii w energetyce obejmują turbiny wiatrowe, fotowoltaikę, elektrolizery, baterie i superkondensatory oraz technologie wodorowe. Zastosowania te mają bezpośrednie przełożenie na efektywność, wydajność, koszt energetyczny oraz trwałość infrastruktury.

Przykłady zastosowań dla sektora energetyki obejmują modyfikowane żywice epoksydowe do łopat turbin, nanonapełniacze w kompozytach, powłoki antykorozyjne oparte na nanocząstkach, nanostrukturalne folie antyrefleksyjne dla PV, katalizatory platyno- i niklowo-nanometryczne w elektrolizerach oraz membrany polimerowe wzmacniane nanocząstkami dla technologii wodorowych.

Polska jest jednym z największych producentów baterii litowo-jonowych w Europie. Oznacza to, że technologie materiałowe mają kluczowe znaczenie dla krajowej gospodarki. Brakuje jednak krajowej produkcji materiałów elektrodowych, separatorów i elektrolitów, co jest strategiczną luką w łańcuchu wartości. Jednocześnie polskie ośrodki badawcze prowadzą intensywne badania nad materiałami anodowymi grafenowymi i nanostrukturalnymi polimerami dla nowych generacji baterii.

Tabela 7 Główne zastosowania nanotechnologii w energetyce w Polsce

Obszar	Przykłady materiałów	Wdrożenia i potencjał
Turbiny wiatrowe	kompozyty z nanonapełniaczami, powłoki antykorozyjne	wzrost popytu dla offshore
Fotowoltaika	warstwy antyrefleksyjne, materiały metaliczne	rosnący rynek modernizacji modułów

Wodór	katalizatory nano-Pt, membrany AEM, PEM	perspektywa dużych inwestycji
Baterie	nanostrukturalne materiały elektrodowe	brak produkcji w PL, szansa rozwojowa
Superkondensatory	struktury węglowe	wysoka aktywność naukowa

Z punktu widzenia Polski największy potencjał dotyczy powłok antykorozyjnych dla offshore, materiałów do fotowoltaiki oraz materiałów elektrodowych nowej generacji.

5.2. Transport, elektromobilność i mobilność przyszłości

Transport wykorzystuje materiały zaawansowane w sposób szeroki i wielowymiarowy. Pojazdy elektryczne wykorzystują nanotechnologię w bateriach, elektronice mocy, układach chłodzenia, materiałach konstrukcyjnych i zabezpieczeniach chemicznych.

W Polsce rośnie znaczenie kompozytów stosowanych w autobusach elektrycznych i wodorowych produkowanych przez Solaris, Autosan i inne firmy. Kompozyty nanowzmocnione redukują masę pojazdów i zwiększają ich trwałość. Powłoki przewodzące i materiały EMI shielding chronią elektronikę.

Zastosowania obejmują również katalizatory spalinowe oparte na nanometalach w pojazdach spalinowych, jednak ich znaczenie maleje wraz ze wzrostem udziału elektromobilności.

Przykłady technologii stosowanych w pojazdach

- powłoki odporne na korozję,
- materiały polimerowe wzmocnione nano-krzemionką,
- materiały tłumiące drgania,
- powłoki zabezpieczające baterie,
- nanowłókna w filtrach powietrza,
- printowane przewodniki dla elektroniki mocy.

Na tle Europy Polska wyróżnia się dużą produkcją autobusów zeroemisyjnych, co tworzy naturalny rynek dla materiałów zaawansowanych.

5.3. Budownictwo i infrastruktura

Sektor budowlany jest jednym z największych odbiorców nanomateriałów. Zastosowania obejmują powłoki funkcjonalne, farby z nanododatkami, ciepłochronne materiały izolacyjne, powłoki antygraffiti, materiały o zwiększonej odporności ogniowej oraz nanocząstki stosowane jako dodatki do betonu.

Nanocząstki krzemionki zwiększają wytrzymałość betonu, poprawiają odporność na warunki atmosferyczne oraz przyspieszają procesy wiązania. Nanowłókna mogą wzmacniać strukturę materiałów budowlanych, a powłoki antybakteryjne są stosowane w obiektach publicznych i medycznych.

W Polsce rozwijają się rozwiązania oparte na TiO_2 , ZnO oraz nanocząstkach srebra w materiałach do wykończeń wnętrz, elewacjach i farbach fotokatalitycznych.

Tabela 8 Zastosowania nano w budownictwie

Obszar	Przykłady zastosowań	Potencjał
Powłoki ochronne	antygraffiti, antykorozyjne	wysoki
Materiały konstrukcyjne	beton modyfikowany nano- SiO_2	wysoki
Higiena	powłoki antybakteryjne, farby ochronne	bardzo wysoki

Budownictwo jest jednym z sektorów, które najszybciej wchłaniają technologie nano, ponieważ wymagania regulacyjne i środowiskowe rosną dynamicznie.

5.4. Elektronika, fotonika i sensoryka

Najbardziej zaawansowane technologicznie zastosowania dotyczą elektroniki. Nanotechnologia jest kluczowa dla rozwoju sensorów, chipów, ekranów, materiałów transparentnie przewodzących oraz elementów fotonicznych.

Polska wyróżnia się szczególnie w obszarze drukowanych materiałów elektronicznych, gdzie XTPL prowadzi projekty na skalę światową. Nanotusze pozwalają drukować ścieżki przewodzące o bardzo wysokiej rozdzielczości, co jest kluczowe dla ekranów, czujników i zaawansowanych mikrostruktur.

Na uczelniach rozwijane są nanosensory środowiskowe, sensory glebowe oraz materiały cienkowarstwowe o właściwościach optoelektronicznych. Brakuje natomiast przemysłowego zaplecza produkcyjnego.

5.5. Biomateriały i medycyna

Nanotechnologia znajduje kluczowe zastosowania w biomateriałach. W Polsce rozwijane są opatrunki z nanowłókien, materiały antybakteryjne dla implantów, materiały bioaktywne oraz powłoki antyadhezyjne.

Jednostki takie jak IMIM PAN prowadzą badania nad nanostrukturami dla ortopedii, stomatologii i implantologii. Eksperymentalne zastosowania obejmują nośniki leków na bazie nanocząstek polimerowych, jednak wprowadzenie ich do obrotu jest utrudnione przez bariery regulacyjne.

5.6. Nanoagro i przemysł żywnościowy

Zastosowania nanotechnologii w rolnictwie obejmują nawozy kontrolowanego uwalniania, nanoformulacje ZnO w paszach, materiały antybakteryjne i nanosensory. Polska posiada szczególnie silne kompetencje w tym obszarze.

Przykłady technologii:

- nano- ZnO w paszach zwierzęcych,

- nanosensory glebowe,
- opakowania aktywne na bazie nanopowłok,
- powłoki antybakteryjne dla żywności.

W kolejnych latach nanoagro będzie jednym z najszybciej rosnących segmentów w Polsce.

5.7. Ochrona środowiska i technologie remediacyjne

Jednym z najbardziej perspektywicznych sektorów jest ochrona środowiska. Polska wyróżnia się dużą liczbą publikacji naukowych i projektów w obszarze nanomateriałów środowiskowych.

Zastosowania obejmują nanoadsorbenty, kompozyty magnetyczne usuwające metale ciężkie, materiały fotokatalityczne degradujące VOC, membrany filtracyjne oraz nanowłókna dla filtrów powietrza.

W porównaniu z krajami UE Polska jest jednym z liderów w badaniach nad fotokatalizą i remediacją.

5.8. Analiza potencjału wdrożeniowego dla polskiej gospodarki

Poniższa tabela przedstawia ocenę potencjału wdrożeniowego dla najważniejszych sektorów.

Tabela 9 Potencjał wdrożeniowy nanotechnologii w Polsce do 2035 r.

Sektor	Potencjał	Komentarz
Energetyka	bardzo wysoki	popyt wynikający z transformacji
Transport	wysoki	rozwój elektromobilności
Budownictwo	bardzo wysoki	szybka absorpcja rynku
Elektronika	średni	brak masowej produkcji
Biomateriały	umiarkowany	bariery kliniczne
Rolnictwo	bardzo wysoki	wysokie kompetencje PL
Środowisko	bardzo wysoki	regulacje UE napędzają popyt

Największym obszarem synergii jest połączenie materiałów środowiskowych, nanoagro i powłok funkcjonalnych. Właśnie w tych sektorach Polska może zbudować przewagę międzynarodową.

5.9. Podsumowanie

Nanotechnologie i zaawansowane materiały mają szerokie i szybko rosnące zastosowania w energetyce, transporcie, infrastrukturze, elektronice, medycynie, rolnictwie i ochronie środowiska. Polska gospodarka wykazuje wysoką zdolność absorpcji technologii nano i w wielu obszarach wyróżnia się aktywnością badawczą na tle UE. Najważniejsze atuty Polski to kompetencje naukowe, dynamicznie rosnące firmy oraz szeroki zakres prac badawczych.

Największy potencjał rozwoju do 2035 roku dotyczy powłok funkcjonalnych, materiałów środowiskowych, nanokompozytów, nanoagro oraz drukowanej elektroniki. Realne wykorzystanie tego potencjału wymaga rozwoju infrastruktury pilotażowej, wsparcia regulacyjnego oraz lepszej integracji nauki i biznesu.

ROZDZIAŁ 6 - Mapowanie ekosystemu nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce: infrastruktura, instytucje, firmy, konsorcja, kompetencje i łańcuchy wartości

Analiza ekosystemu nanotechnologii oraz materiałów zaawansowanych wymaga zrozumienia układu instytucjonalnego, infrastruktury, firm, jednostek badawczych, sieci współpracy oraz kanałów komercjalizacji. Polska dysponuje liczną i zróżnicowaną bazą instytucji związanych z nanotechnologiami, jednak ich współdziałanie wciąż pozostaje niepełne. Różnice między potencjałem naukowym a poziomem wdrożeń przemysłowych są znaczące, co stanowi jedną z kluczowych barier rozwoju rynku.

W tym rozdziale przedstawiono szerokie mapowanie polskiego ekosystemu – obejmujące instytuty PAN, uczelnie, instytuty Sieci Łukasiewicz, laboratoria materiałowe, firmy produkcyjne, start-upy oraz organizacje otoczenia biznesu. Analiza obejmuje również ocenę gotowości technologicznej TRL, dostępności infrastruktury testowej, zdolności certyfikacyjnych, potencjału projektowego oraz udziału w łańcuchach wartości europejskich.

6.1. Architektura polskiego ekosystemu nano i materiałów zaawansowanych

Polski ekosystem opiera się na czterech głównych filarach:

- instytuty i uczelnie prowadzące badania podstawowe i stosowane,
- firmy i przedsiębiorstwa wdrażające technologie nano,
- infrastruktura badawcza i testowa,
- instytucje wspierające, w tym klastry, parki technologiczne i platformy międzynarodowe.

Silną stroną Polski jest rozbudowana sieć instytutów naukowych, jednak słabością pozostaje ograniczona liczba centrów pilotowych TRL 6–8 oraz brak systemowych centrów certyfikacji nanomateriałów zgodnych z normami OECD.

Aby ułatwić analizę, poniżej przedstawiono syntetyczną mapę kompetencji.

Tabela 10 Główne filary ekosystemu materiałowego w Polsce

Filar ekosystemu	Charakterystyka	Przykłady podmiotów
Nauka i B+R	wysoki poziom badań	PAN, AGH, PW, PWr, PŚI, ZUT
Przemysł	ograniczona skala produkcji	Nano-Tech Polska, XTPL, Nanores
Infrastruktura	dobra charakterystyka, słabe pilotaże	Łukasiewicz-PORT, IMN
Instytucje wsparcia	klastry i programy	Śląski Klaster Nano, PARP, NCBR

6.2. Instytuty i uczelnie prowadzące badania nano i materiałowe

Polska posiada jedną z największych sieci instytucji badawczych w Europie Środkowo-Wschodniej. Łącznie ponad 40 jednostek prowadzi badania z zakresu nanotechnologii, materiałów funkcjonalnych, kompozytów, powłok, materiałów środowiskowych oraz nanoagro.

Poniżej szczegółowe zestawienie instytucji z podziałem na profile kompetencyjne.

6.2.1. Instytuty PAN

Instytuty Polskiej Akademii Nauk odgrywają kluczową rolę w badaniach podstawowych i stosowanych.

Instytut Chemii Fizycznej PAN

Specjalizacja: nanomateriały funkcjonalne, kataliza, inżynieria powierzchni, cienkie warstwy.

Jeden z najbardziej prestiżowych ośrodków badawczych w Polsce.

Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN

Specjalizacja: katalizatory nano, nanostruktury metaliczne i tlenkowe, materiały hybrydowe.

Instytut Fizyki PAN

Specjalizacja: materiały dla fotoniki, cienkie warstwy, elektronika funkcjonalna.

Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN

Specjalizacja: materiały metaliczne, biomateriały, stopy specjalne, materiały przewodzące.

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN

Specjalizacja: materiały magnetyczne, nadprzewodniki, struktury niskowymiarowe.

Instytut Chemii Organicznej PAN

Specjalizacja: polimery funkcjonalne, nanoemulsje, bioaktywne materiały.

6.2.2. Uczelnie techniczne

Największe ośrodki badawcze:

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Specjalizacja: metalurgia, ceramika, metamateriały, kompozyty, materiały wysokotemperaturowe.

Politechnika Warszawska

Specjalizacja: inżynieria materiałowa, nanowłókna, powłoki funkcjonalne, techniki addytywne.

Politechnika Wrocławska

Specjalizacja: grafen, nanorurki, materiały przewodzące, cienkie warstwy.

Politechnika Śląska

Specjalizacja: inżynieria powierzchni, powłoki hybrydowe, kompozyty, materiały konstrukcyjne.

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny

Specjalizacja: materiały środowiskowe, fotokataliza, remediacja.

Uniwersytet Gdański, Uniwersytet Łódzki, Uniwersytet Wrocławski

Specjalizacja: nanochemia, bio-nano, interakcje nano-bio.

6.3. Instytuty Sieci Łukasiewicz

Sieć Łukasiewicz pełni rolę pomostu między nauką a gospodarką. Kilka instytutów prowadzi zaawansowane badania materiałowe.

Łukasiewicz-PORT

Technologie nano, bio i materiałowe, centra mikroskopii wysokiej klasy, rozwinięte prototypowanie.

Łukasiewicz-IMN

Materiały metaliczne, inżynieria powierzchni, materiały dla przemysłu.

Łukasiewicz-ICSO

Polimery, materiały chemiczne, powłoki.

Łukasiewicz-EMAG

Technologie sensorowe i środowiskowe.

Sieć Łukasiewicz ma ogromny potencjał, ale brakuje jej infrastruktury pilotażowej pozwalającej na skalowanie nanomateriałów do produkcji przemysłowej.

6.4. Infrastruktura badawcza i laboratoria

Polska dysponuje zaawansowaną infrastrukturą analityczną obejmującą:

- mikroskopię SEM, TEM, AFM,
- spektroskopię IR, Raman, XPS, XRF,
- analizatory powierzchni,
- urządzenia do litografii,
- urządzenia do testów mechanicznych materiałów,
- platformy do syntezy chemicznej.

Słabością pozostaje brak:

- certyfikacji OECD,
- standardów toksykologicznych nano,
- platform testowych dla produktów nano,
- centrów pilotażowych TRL 6–8.

Bez infrastruktury pilotażowej polskie firmy nie mogą skalować produkcji materiałów.

6.5. Firmy i przedsiębiorstwa działające w nanotechnologiach

Polski sektor prywatny obejmuje:

- producentów nanomateriałów metalicznych i tlenkowych,
- firmy wytwarzające powłoki funkcjonalne,
- firmy kompozytowe,
- start-upy elektroniki drukowanej,
- firmy środowiskowe i agro-nano,
- dostawców sprzętu nano.

Tabela 11 Najważniejsze firmy tworzące polski rynek nano

Firma	Specjalizacja	Komentarz
Nanores	nanofabrykacja, litografia	jedna z najbardziej zaawansowanych firm w PL
XTPL	nanotusze przewodzące	rozpoznawalność globalna
Nano-Tech Polska	nanometale, powłoki	silna pozycja rynkowa
Smart Nanotechnologies	nano-Ag, nano-Cu	surowce dla przemysłu
Hybrid Glass Technologies	materiały hybrydowe	nisza o dużym potencjale
InnoEcoTech	membrany i filtry	sektor środowiskowy
Fosfan S.A.	agro	możliwość nanoformulacji

Z punktu widzenia gospodarki brakuje dużych przedsiębiorstw zdolnych do produkcji nanomateriałów w skali przemysłowej. Polska opiera się głównie na sektorze MŚP.

6.6. Klastry, platformy i konsorcja

Organizacje takie jak Śląski Klaster Nano pełnią rolę integratora środowisk naukowo-przemysłowych. Klastry ułatwiają transfer technologii, współpracę projektową oraz tworzenie konsorcjów.

Najważniejsze organizacje:

Śląski Klaster Nano

Platforma współpracy nauka-biznes w obszarze nano i materiałów.

Polski Klaster Technologii Kompozytowych

Jednostka scalająca sektor kompozytowy.

Klastry ICT i elektroniki

Podmioty współpracujące przy nanosensorach i elektronice drukowanej.

PARP, NCBR, PFR

Instytucje tworzące instrumenty finansowania projektów nano.

6.7. Łańcuch wartości nanotechnologii w Polsce

Polski łańcuch wartości jest kompletny na poziomie badań, lecz niekompletny na poziomie produkcji.

Tabela 12 Ocena polskiego łańcucha wartości

tap	Ocena	Komentarz
B+R	bardzo silne	Polska mocno osadzona naukowo
Synteza materiałów	rozwinięta	silne kompetencje
Charakterystyka	rozwinięta	bardzo dobre laboratoria
Nanofabrykacja	umiarkowana	luka infrastrukturalna
Pilotaże	słabe	brak centrów TRL 6–8
Produkcja	ograniczona	dominacja MŚP
Skalowanie	słabe	wysoki koszt wejścia
Eksport	niski	brak dużej produkcji

To najważniejszy strukturalny problem polskiego ekosystemu.

6.8. Ocena gotowości technologicznej TRL

Poziomy TRL w Polsce kształtują się następująco:

- TRL 1–4: bardzo silne (instytuty PAN, uczelnie),
- TRL 5–6: umiarkowanie silne (wybrane instytuty Łukasiewicza),
- TRL 7–9: bardzo słabe (prawie brak infrastruktury).

Jest to krytyczna bariera dla komercjalizacji.

6.9. Modele komercjalizacji w Polsce

Najczęściej stosowane modele:

- komercjalizacja przez start-upy,
- licencjonowanie technologii,
- konsorcja nauka-biznes,
- wdrożenia w sektorze publicznym (środowisko, infrastruktura).

Modele te działają, ale są ograniczone przez brak instrumentów finansowania TRL 6–8.

6.10. Polska na tle najlepszych ekosystemów światowych

Kraje takie jak Korea, Japonia, USA, Niemcy i Holandia mają pełne łańcuchy wartości, silne centra pilotażowe, programy strategiczne i duże firmy przemysłowe. Polska jest wciąż krajem „naukowym”, nie „materiałowym”.

Jednak dzięki bardzo silnym kompetencjom środowiskowym, kompozytowym i funkcjonalnym Polska ma szansę dołączyć do liderów w wybranych niszach.

6.11. Wnioski z mapowania ekosystemu

Polska posiada dużą liczbę instytucji, rozwinięte laboratoria i silną bazę akademicką. Główną słabością pozostaje brak infrastruktury pilotażowej, certyfikacyjnej i dużych firm materiałowych. Jednocześnie rośnie liczba start-upów i firm technologicznych, co jest pozytywnym sygnałem.

Największy potencjał rozwoju mają:

- materiały środowiskowe,
- powłoki funkcjonalne,
- nanokompozyty,
- druki funkcjonalne,
- nanoagro.

ROZDZIAŁ 7 - Finansowanie nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce: źródła, mechanizmy wsparcia, inwestycje, granty, polityki UE i analiza luki finansowej do 2035

Rozwój nanotechnologii i materiałów zaawansowanych wymaga stabilnego, wieloetapowego i długoterminowego finansowania. Ten obszar charakteryzuje się wysokim ryzykiem technologicznym, długim czasem dojrzewania, złożonymi procesami certyfikacyjnymi oraz wysokimi kosztami uruchomienia produkcji. Nanotechnologie wymagają kapitału na badania podstawowe, laboratoria, pilotaże, certyfikację, skalowanie oraz komercjalizację.

W przeciwieństwie do technologii cyfrowych, które mogą rozwijać się w modelu „lean”, technologie materiałowe działają w logice kapitałochłonnych inwestycji. Tymczasem polski system finansowania innowacji jest zaprojektowany bardziej pod usługi i technologie cyfrowe niż pod sektor materiałowy. W rezultacie powstaje luka finansowa, która w największym stopniu blokuje rozwój firm nano oraz wdrażanie technologii naukowych.

W rozdziale dokonano pogłębionej analizy źródeł finansowania, istniejących mechanizmów, dostępnych grantów i instrumentów UE oraz przedstawiono ocenę luki finansowania TRL 4–9 na tle najlepszych krajów w UE i OECD.

7.1. Źródła finansowania dostępne w Polsce

Polskie źródła finansowania można podzielić na pięć grup:

- granty i programy publiczne,
- fundusze europejskie,
- fundusze venture capital i CVC,
- inwestycje przemysłowe i strategiczne,
- projekty międzynarodowe i partnerstwa.

Każda grupa charakteryzuje się inną dostępnością, ryzykiem i skalą.

Tabela 13 Główne źródła finansowania nanotechnologii w Polsce

Źródło	Charakterystyka	Poziom TRL
NCBR	duże projekty B+R	TRL 1–6
NCN	badania podstawowe	TRL 1–3
FENG	inwestycje i B+R	TRL 3–8
PARP	projekty dla MŚP	TRL 4–7
Venture capital	kapitał prywatny	TRL 5–9
CVC	przemysł, energetyka	TRL 6–9
Programy UE	duże projekty	TRL 4–9

7.2. Finansowanie z NCBR i NCN

NCN finansuje badania podstawowe, które są fundamentem nano i materiałów. Polska nauka jest w tym obszarze dobrze finansowana, a liczba projektów dedykowanych syntezie, charakterystyce i powłokom jest duża. Problemem nie jest TRL 1–3, lecz TRL 5–9, gdzie finansowanie staje się niewystarczające.

NCBR oferuje projekty takie jak:

- Ścieżka SMART,
- projekty aplikacyjne,
- projekty demonstracyjne,
- programy sektorowe.

Jednak większość projektów kończy się pilotażami na małą skalę i nie prowadzi do produkcji przemysłowej.

7.3. Finansowanie z funduszy FENG

Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki stanowią kluczowy element finansowania nano w latach 2021–2027. Programy takie jak:

- Ścieżka SMART,
- Innowacje Cyfrowe,
- Infrastruktura B+R,
- Zielona Gospodarka,

Pozwalają finansować syntezę materiałów, laboratoria, pilotaże i demonstratory. Kluczowe znaczenie ma możliwość łączenia modułów i realizacji projektów wielosegmentowych.

W FENG przedsiębiorstwa mogą finansować:

- budowę linii pilotażowych,
- laboratoria do syntezy i obróbki nano,
- nanofabrykację,
- pilotaże powłok, kompozytów i membran,
- infrastrukturę dla agro-nano i nanośrodowiska.

Brakuje jednak dedykowanego programu materiałowego.

7.4. Finansowanie z UE i projektów międzynarodowych

Unia Europejska uznaje materiały zaawansowane za technologie strategiczne. Finansowanie dostępne jest w ramach programów:

- Horyzont Europa,
- EIC Pathfinder, EIC Transition, EIC Accelerator,
- Clean Hydrogen JU,

- Innovation Fund,
- Digital Europe,
- LIFE.

Polskie jednostki badawcze intensywnie korzystają z Horyzontu Europa, lecz firmy nadal mają niski udział. Największe szanse dotyczą:

- materiałów środowiskowych,
- nanokompozytów,
- nanosensorów,
- nanoagro,
- powłok funkcjonalnych.

7.5. Venture capital i inwestorzy technologiczni

Rynek VC w Polsce jest niewystarczająco rozwinięty dla technologii głębokich. Kapitał kieruje się w stronę software, e-commerce, marketplace'ów i fintech. Deep-tech, szczególnie nano, wymaga:

- większych rund,
- dłuższego horyzontu zwrotu,
- wyższego ryzyka,
- infrastruktury testowej.

W Polsce brakuje funduszy wyspecjalizowanych w materiałach. Najbliżej są fundusze:

- HiTech Venture Fund,
- PFR Ventures,
- fundusze korporacyjne branży chemicznej i energetycznej.

7.6. Finanse korporacyjne i CVC

Firmy energetyczne, chemiczne, farmaceutyczne i przemysłowe w Europie inwestują w materiały zaawansowane, tworząc korporacyjne fundusze CVC. W Polsce takie mechanizmy dopiero powstają.

Największy potencjał finansowania CVC mają:

- grupa ORLEN (chemia, petrochemia, polimery),
- KGHM (metale, nanostruktury miedzi),
- Synthos (polimery, powłoki),
- grupa Azoty (chemia, agro-nano),
- firmy energetyczne rozwijające offshore i wodór.

CVC jest kluczowy dla TRL 6–9.

7.7. Luka finansowania TRL 5–9 w Polsce

Największy problem rynku nano i materiałów nie dotyczy B+R, lecz skalowania.

Tabela 14 Główne luki finansowe w polskim systemie wsparcia

ap TRL	Ocena dostępności finansowania	Komentarz
TRL 1–3	bardzo dobre	NCN i badania podstawowe
TRL 4–5	dobrze	projekty NCBR
TRL 6	umiarkowane	część projektów FENG
TRL 7–8	słabe	brak pilotaży
TRL 9	bardzo słabe	brak instrumentów skalowania

Najważniejsza luka dotyczy:

- linii pilotażowych,
- certyfikacji,
- skalowania,
- wdrożeń przemysłowych.

Bez tych elementów firm nano nie będzie.

7.8. Wydatki B+R w Polsce a kraje wiodące

Polska wydaje około 1,44 procent PKB na B+R. To wartość poniżej średniej UE. Dla porównania:

- Niemcy 3,1 procent,
- Finlandia 2,9 procent,
- Holandia 2,3 procent,
- Korea Południowa 4,8 procent.

Z powodu niskich wydatków B+R firmy nano nie mają wystarczającego wsparcia.

7.9. Scenariusze finansowania do 2035

Trzy scenariusze:

- Scenariusz minimalny: utrzymanie obecnego poziomu, niski wzrost rynku nano.
- Scenariusz realny: podwojenie finansowania pilotaży, stabilny wzrost.
- Scenariusz dynamiczny: stworzenie Polskiej Strategii Materiałowej i centrów TRL 6–9.

Najkorzystniejszy jest scenariusz trzeci.

7.10. Rekomendacje strategiczne dla Polski

- Stworzenie Krajowej Strategii Materiałowej.
- Budowa centrów pilotażowych nano.
- Dedykowane programy dla TRL 6–9.
- Wsparcie dla firm produkujących materiały.
- Inicjacja Polskiego Funduszu Materiałowego.
- Aktywizacja CVC i dużych przedsiębiorstw.

7.11. Podsumowanie

Polska posiada silną bazę naukową, ale słabe finansowanie wdrożeń. Największa luka dotyczy etapów TRL 7–9. Konieczne jest stworzenie kompleksowego systemu finansowania od badania do produkcji. Bez infrastruktury pilotażowej Polska nie stanie się liderem w materiałach.

ROZDZIAŁ 8 – Polska na tle świata: pozycja konkurencyjna, benchmarking międzynarodowy, specjalizacje strategiczne oraz analiza szans eksportowych nanotechnologii i materiałów zaawansowanych do 2035

Pozycja Polski na globalnej mapie nanotechnologii i zaawansowanych materiałów jest złożona. Z jednej strony kraj dysponuje silną bazą naukową, wysoką aktywnością publikacyjną oraz rosnącą liczbą jednostek badawczych i firm działających w obszarze nano. Z drugiej strony brakuje pełnej integracji ekosystemu, infrastruktury pilotażowej oraz dużych przedsiębiorstw, które byłyby w stanie konkurować na światowym rynku materiałów w segmencie produkcji masowej.

Aby zrozumieć potencjał Polski, konieczne jest zestawienie jej kompetencji z krajami o najwyższym poziomie innowacji materiałowych. Analiza obejmuje porównanie pięciu modeli krajów wiodących: Niemiec, Holandii, Korei Południowej, Japonii i USA, a także ocenę nisz, w których Polska może zbudować przewagę konkurencyjną.

Ten rozdział przedstawia szczegółowe porównanie kompetencji, infrastruktury, finansowania i strategii materiałowych, a także analizę potencjału eksportowego polskich firm.

8.1. Modele narodowe rozwoju nanotechnologii

W globalnym krajobrazie można wyróżnić pięć wiodących modeli:

- model niemiecki – strategia systemowa, łańcuch wartości od B+R do przemysłu,
- model holenderski – integracja nauki i przemysłu z naciskiem na fotonikę i elektronikę,
- model japoński – nacisk na precyzję, kontrolę jakości i materiały specjalistyczne,
- model koreański – agresywne inwestycje w masową produkcję elektroniki i półprzewodników,
- model amerykański – ekosystem start-upowy i venture capital z silnymi korporacjami high-tech.

Każdy z nich może być dla Polski punktem odniesienia.

8.2. Pozycja Polski względem krajów wiodących

Poniższa tabela prezentuje syntetyczne porównanie.

Tabela 15 Benchmark pozycji Polski do 2035 roku

Obszar	Polska	Niemcy	Holandia	USA	Japonia	Korea Płd.
Kompetencje B+R	wysokie	bardzo wysokie	wysokie	bardzo wysokie	wysokie	wysokie
Produkcja nano	średnie	bardzo wysokie	wysokie	wysokie	wysokie	bardzo wysokie

Powłoki funkcjonalne	wysokie	bardzo wysokie	średnie	wysokie	wysokie	średnie
Materiały węglowe	średnie	wysokie	wysokie	bardzo wysokie	wysokie	wysokie
Elektronika nano	niskie	bardzo wysokie	bardzo wysokie	bardzo wysokie	bardzo wysokie	bardzo wysokie
Agro-nano	wysokie	średnie	średnie	niskie	średnie	średnie
Materiały środowiskowe	bardzo wysokie	wysokie	średnie	średnie	średnie	średnie
Infrastruktura pilotażowa	niska	bardzo wysoka	wysoka	wysoka	wysoka	wysoka
Finansowanie TRL 7–9	bardzo niskie	wysokie	wysokie	bardzo wysokie	wysokie	wysokie
Intensywność eksportowa	niska	bardzo wysoka	wysoka	bardzo wysoka	wysoka	wysoka

Wyniki pokazują wyraźnie, że Polska ma mocne strony, jednak kluczowe elementy łańcucha wartości – pilotaże, certyfikacje, skalowanie – pozostają słabe.

8.3. Analiza przewag konkurencyjnych Polski

Polska ma trzy obszary, w których jej potencjał wyróżnia się na tle świata.

8.3.1. Materiały środowiskowe i remediacyjne

Polskie uczelnie i instytuty prowadzą zaawansowane badania nad:

- fotokatalizą TiO_2 i ZnO ,
- nanoadsorbentami,
- kompozytami magnetycznymi,
- membranami filtracyjnymi,
- materiałami antybakteryjnymi.

Polska jest europejskim liderem publikacji naukowych w tej dziedzinie. Sektor środowiskowy ma najłatwiejszą ścieżkę komercjalizacji ze względu na rosnące wymogi regulacyjne UE.

8.3.2. Nanoagro i materiały dla rolnictwa

Europa doświadcza kryzysu nawozowego i zmian klimatu. Polska ma unikalny potencjał dzięki nanomateriałom ZnO , nanosensorom glebowym oraz produktom poprawiającym efektywność nawożenia.

Ten sektor stoi na początku komercjalizacji – jest to zdecydowanie nisza eksportowa.

8.3.3. Powłoki funkcjonalne i inżynieria powierzchni

Polska ma silny przemysł powłokowy i wiele firm produkujących:

- powłoki antybakteryjne,

- powłoki fotokatalityczne,
- powłoki barierowe,
- powłoki antykorozyjne.

Ten segment jest blisko rynku i generuje wysoką marżę.

8.4. Obszary, w których Polska pozostaje w tyle

Polska nie ma kompetencji masowej produkcji w obszarach:

- półprzewodniki i elektronika nano,
- materiały fotoniczne wysokiej czystości,
- prepregi kompozytowe,
- zaawansowane włókna węglowe,
- materiały dla baterii litowo-jonowych.

Brakuje dużych inwestycji przemysłowych i centrów pilotażowych.

8.5. Ocena eksportowego potencjału polskich nanotechnologii

Analiza potencjału eksportowego wskazuje trzy główne segmenty:

8.5.1. Powłoki i dodatki funkcjonalne

Powłoki polimerowe, fotokatalityczne, antybakteryjne, barierowe i przewodzące znajdują nabywców:

- w branży budowlanej,
- w medtech,
- w elektronice,
- w przemyśle spożywczym.

Polskie technologie w tym obszarze są konkurencyjne cenowo i jakościowo.

8.5.2. Materiały środowiskowe

Wysoki popyt na:

- filtry powietrza,
- nanowłókna,
- membrany do wody,
- nanoadsorbenty metali,
- wynika z globalnych regulacji środowiskowych.

Polska może stać się regionalnym centrum produkcji takich materiałów.

8.5.3. Nanoagro

Rosnący rynek nawozów nano i pasz wzbogaconych w ZnO stwarza możliwość ekspansji na rynki:

- Ameryki Południowej,
- Azji Południowej,
- Afryki Północnej.

Polskie produkty są tańsze niż zachodnie odpowiedniki, a kraj ma wysoką kompetencję chemiczną.

8.6. Analiza barier eksportowych

Największe bariery:

- brak certyfikatów OECD,
- brak norm środowiskowych nano dla eksportu,
- niska skala produkcji,
- słaba rozpoznawalność polskich firm,
- brak centrów walidacji i testów,
- niedostateczne finansowanie marketingu i ekspansji.

Bez spełnienia norm UE i OECD eksport jest utrudniony.

8.7. Przykłady udanych wdrożeń międzynarodowych

- XTPL – eksport nanotuszy do firm w USA, Korei i Japonii,
- Nanores – usługi nanofabrykacji dla firm z Europy Zachodniej,
- polskie powłoki fotokatalityczne – eksportowane do kilku krajów UE,
- nanoformulacje ZnO – testowane na rynkach azjatyckich.

To dowody, że Polska ma realny potencjał globalny.

8.8. Scenariusze rozwoju pozycji Polski do 2035 roku

Scenariusz 1: Utrzymanie tempa

Polska rozwija się wyłącznie na bazie badań naukowych, przy niskiej skali komercjalizacji.

Scenariusz 2: Polska niszowym liderem

Polska buduje przewagę w obszarach: powłoki, środowisko, agro-nano.

Scenariusz 3: Polska jako regionalne centrum materiałowe

Wymaga silnego wsparcia państwa, budowy centrów pilotażowych i aktywizacji przemysłu.

Najbardziej realistyczny jest scenariusz drugi.

8.9. Kluczowe nisze strategiczne dla Polski

- powłoki i inżynieria powierzchni,
- membrany i materiały środowiskowe,
- nanoagro,
- kompozyty,
- drukowana elektronika,
- materiały hybrydowe dla budownictwa.

To sektory o wysokiej marżowości i niskich barierach wejścia.

8.10. Podsumowanie

Polska zajmuje silną pozycję naukową w nanotechnologiach, jednak jej pozycja rynkowa jest ograniczona. Największy potencjał wiąże się z sektorami: środowiskowym, agro-nano, powłokami funkcjonalnymi i kompozytami. Aby go wykorzystać, kraj musi wzmocnić infrastrukturę pilotażową, certyfikacyjną i eksportową.

Polska ma realną szansę stać się liderem niszowych sektorów nanotechnologii w Europie Środkowo-Wschodniej.

ROZDZIAŁ 9 – Ryzyka, regulacje i bezpieczeństwo nanotechnologii: ramy prawne, ekotoksykologia, certyfikacja, akceptacja społeczna i wymogi UE do 2035 roku

Nanotechnologie i materiały zaawansowane należą do najbardziej perspektywicznych, a jednocześnie najbardziej regulowanych obszarów współczesnej gospodarki. Łączą w sobie ogromny potencjał technologiczny z koniecznością zachowania szczególnego reżimu bezpieczeństwa, zarówno ze względu na zdrowie ludzi, jak i na środowisko. W przeciwieństwie do wielu innych dziedzin innowacji, takich jak cyfryzacja czy analityka danych, nanotechnologie podlegają ścisłej kontroli prawnej i toksykologicznej. Wynika to z faktu, że materiały o wielkości nanometrycznej mogą zachowywać się odmiennie od swoich odpowiedników makroskopowych, mogą wchodzić w nowe reakcje chemiczne, oddziaływać z organizmami w sposób trudny do przewidzenia i przenikać do środowiska na drodze, której tradycyjne materiały nie podlegają.

W Unii Europejskiej regulacje dotyczące nanotechnologii są rozproszone, ale konsekwentne. Znajdują się w aktach prawnych dotyczących chemikaliów, żywności, pasz, kosmetyków, produktów biobójczych, środowiska, wyrobów budowlanych, a nawet odpadów. Państwa członkowskie muszą wdrażać te przepisy i prowadzić nadzór nad ich realizacją, co oznacza konieczność posiadania odpowiednich laboratoriów, systemów certyfikacji, baz danych i kompetencji toksykologicznych. Polska, podobnie jak wiele krajów Europy Środkowo-Wschodniej, posiada rozwinięte zaplecze naukowe, ale brakuje jej infrastruktury referencyjnej i systemowej koordynacji bezpieczeństwa nano.

9.1. Europejskie i krajowe ramy prawne dotyczące nanomateriałów

Podstawą europejskich regulacji jest definicja nanomateriału przyjęta przez Komisję Europejską, zgodnie z którą materiał zawierający co najmniej 50 procent cząstek w zakresie 1–100 nm podlega specjalnym wymogom. Definicja ta ma zastosowanie w największych aktach regulacyjnych UE, w tym w REACH, CLP, rozporządzeniach dotyczących kosmetyków, żywności, pasz i produktów biobójczych. Od kilku lat każda forma nanomateriału o odmiennym kształcie, wielkości lub właściwościach powierzchniowych musi być rejestrowana jako osobna substancja. Jest to jeden z najbardziej restrykcyjnych przepisów na świecie.

REACH wprowadza obowiązek dostarczania szczegółowych danych dotyczących charakterystyki fizykochemicznej, toksykologii, biodystrybucji, stabilności, transportu środowiskowego oraz interakcji nano z organizmami. Firmy muszą udowodnić bezpieczeństwo swoich materiałów, niezależnie od tego, czy mają one analog w postaci makroskopowej. To fundamentalna różnica w stosunku do regulacji amerykańskich, gdzie podejście do nano jest mniej restrykcyjne.

Polska implementuje te przepisy, ale nie posiada krajowej instytucji referencyjnej, która odpowiadałaby za certyfikację nanomateriałów. Firmy i instytuty zmuszone są zlecać testy w Niemczech, Holandii, Francji lub krajach skandynawskich. Proces ten wydłuża wdrożenia i znacząco zwiększa koszty komercjalizacji.

W sektorze żywności i pasz, EFSA wymaga osobnych ocen bezpieczeństwa dla nano-ZnO, nano-TiO₂ i innych składników o wielkości nanometrycznej. W przypadku nanoagro regulacje są jeszcze bardziej złożone, ponieważ łączą wymogi chemiczne, środowiskowe i żywnościowe. Dla Polski jest to istotne, ponieważ nano-ZnO należy do głównych kierunków badawczych i komercyjnych.

W sektorze kosmetycznym obowiązuje zasada pełnej transparentności: każdy składnik nano musi być oznaczony w składzie dopiskiem „nano”. Dotyczy to filtrów UV (TiO₂, ZnO), nanopolimerów oraz nanometali. Dodatkowo producenci są zobowiązani do zgłoszenia takich produktów w europejskiej bazie CPNP.

W zakresie ochrony środowiska UE nie posiada jeszcze spójnych norm dotyczących dopuszczalnych stężeń nano w wodzie, glebie czy powietrzu, ale trwają prace nad wytycznymi dotyczącymi oceny ryzyka środowiskowego. Aby przygotować się na nowe regulacje, państwa członkowskie muszą rozwinąć zaplecze laboratoryjne, co stanowi poważne wyzwanie dla Polski.

9.2. Normy, standardy i metody oceny nanomateriałów

System oceny bezpieczeństwa nano opiera się na normach ISO i wytycznych OECD. Normy ISO/TC229 definiują metody pomiaru rozkładu wielkości cząstek, powierzchni właściwej, zeta potential, stabilności koloidalnej, a także zasady projektowania badań toksykologicznych. OECD opracowało zestaw testów środowiskowych, obejmujących wpływ nanomateriałów na mikroorganizmy, rośliny, ryby, bezkręgowce oraz analizy biodegradacji.

Polska nie posiada dziś laboratoriów akredytowanych do pełnego zakresu badań nano według OECD, co jest jedną z najpoważniejszych barier w komercjalizacji. Jednostki akademickie prowadzą badania toksykologiczne, ale nie są one uznawane jako testy referencyjne w procesach certyfikacyjnych. W rezultacie firmy muszą korzystać z laboratoriów zagranicznych, co wydłuża proces wdrożeń często o 12–24 miesiące.

W praktyce oznacza to, że Polska dysponuje silnym potencjałem badawczym, ale brak instytucjonalnego zaplecza do certyfikacji prowadzi do sytuacji, w której wiele technologii zatrzymuje się na poziomie badań TRL 4–6, nie osiągając skali przemysłowej.

9.3. Ekotoksykologia nanomateriałów i ryzyko środowiskowe

Nanomateriały mogą oddziaływać na środowisko w sposób złożony, zależny od ich wielkości, kształtu, stabilności oraz ładunku powierzchniowego. W przeciwieństwie do materiałów makroskopowych, mogą przenikać do tkanek organizmów, być pobierane przez rośliny, migrować do wód gruntowych lub uczestniczyć w nieoczekiwanych reakcjach chemicznych. Ocena ryzyka środowiskowego musi zatem obejmować pełny cykl życia materiału.

W Polsce prowadzi się liczne badania nad toksycznością nano-TiO₂, nano-ZnO, nanometali oraz nanokompozytów magnetycznych. ZUT, Uniwersytet Warszawski, instytuty PAN oraz część jednostek Łukasiewicza posiadają kompetencje w tym obszarze. Brakuje jednak centralnego ośrodka referencyjnego, który prowadziłby standardowe testy zgodne z OECD.

Z punktu widzenia strategii państwa ekotoksykologia nano wymaga pilnych inwestycji, ponieważ zaostrenie regulacji jest nieuniknione. UE przygotowuje nowe normy dotyczące nano w wodzie, glebie i powietrzu oraz planuje wprowadzenie monitoringu środowiskowego nano, co będzie wymagało infrastruktury analitycznej na poziomie krajowym.

9.4. Bezpieczeństwo pracy i ryzyka zawodowe

Zagrożenia związane z pracą z nanomateriałami obejmują narażenie na aerozole, kontakt ze skórą, możliwość połknięcia i ekspozycję na reaktywne formy metali. Pracownicy laboratoriów, linii syntezy oraz zakładów powłokowych należą do grupy podwyższonego ryzyka.

Polska nie posiada jednak dedykowanych wytycznych BHP dla sektora nano. Firmy korzystają z norm amerykańskich OSHA oraz europejskich ISO, ale brakuje spójnych krajowych standardów dotyczących wentylacji, środków ochrony osobistej, monitoringu aerozoli i zarządzania odpadami nano.

Aby sektor mógł się rozwijać, konieczne jest opracowanie polskich norm i procedur BHP oraz utworzenie programów szkoleniowych dla laboratoriów akademickich i przemysłowych.

9.5. Ryzyka rynkowe, regulacyjne i technologiczne

Nanotechnologie charakteryzują się wysokim stopniem niepewności rynkowej. Firmy muszą ponosić wysokie koszty certyfikacji, a cykle wdrożeń są dłuższe niż w większości innych sektorów. Ryzyka dotyczą m.in.:

- nieprzewidywalnych zmian regulacyjnych,
- konieczności dostarczania nowych danych toksykologicznych,
- trudności w skalowaniu syntezy nano,
- wysokich kosztów badań bezpieczeństwa,
- oporu społecznego w niektórych zastosowaniach (żywność, kosmetyki).

Te elementy sprawiają, że technologie nano wymagają długoterminowego wsparcia państwa oraz dostępu do instrumentów finansowania TRL 6–9.

9.6. Akceptacja społeczna i komunikacja publiczna

Badania europejskie pokazują, że społeczeństwo pozytywnie ocenia nanotechnologie w produktach środowiskowych, energetycznych, medycznych czy infrastrukturalnych, ale wykazuje obawy w obszarach spożywczych, kosmetycznych i związanych bezpośrednio z organizmem ludzkim. Efekt ten, znany jako „nano risk perception”, jest zjawiskiem powszechnym i wymaga przemyślanej komunikacji publicznej.

W Polsce brakuje systemowej edukacji dotyczącej nanotechnologii. Informacje publikowane przez instytuty naukowe trafiają głównie do wąskiego grona odbiorców. Tymczasem rozwój nano, szczególnie w żywności i medycynie, wymaga narzędzi transparentnej komunikacji skierowanej do konsumentów oraz systemów oznakowania, które zwiększą poczucie bezpieczeństwa.

9.7. Wpływ regulacji na konkurencyjność polskich firm

Regulacje UE są rygorystyczne, co z jednej strony zwiększa bezpieczeństwo, ale z drugiej podnosi bariery wejścia na rynek. Firmy z Niemiec, Holandii czy Francji posiadają własne centra certyfikacyjne i pilotażowe, co daje im przewagę. Polska, nie mając takiej infrastruktury, zmuszona jest korzystać z usług zagranicznych, co zwiększa koszty i wydłuża proces rozwoju.

Efekt ten sprawia, że polskie przedsiębiorstwa są mniej konkurencyjne na rynku europejskim, mimo że dysponują wysokiej jakości technologiami. Brak infrastruktury certyfikacyjnej jest jedną z największych barier rozwojowych w polskim systemie innowacji materiałowych.

9.8. Perspektywa regulacyjna do 2035 roku

Do 2035 roku można spodziewać się zaostrzenia przepisów dotyczących rejestracji nano, wprowadzenia norm środowiskowych, obowiązku monitoringu nano w odpadach komunalnych i przemysłowych oraz nowych wymogów w zakresie agro-nano. UE będzie również dążyć do standaryzacji testów toksykologicznych oraz wprowadzenia zharmonizowanego systemu oceny ryzyka nano.

Dla Polski oznacza to konieczność budowy infrastruktury i kadr, które będą w stanie zapewnić zgodność z nowymi regulacjami.

9.9. Podsumowanie

Nanotechnologie należą do sektorów strategicznych, ale ich rozwój wymaga wyjątkowego podejścia regulacyjnego i toksykologicznego. Polska dysponuje silnym zapleczem naukowym, jednak brakuje jej instytucji certyfikacyjnych, laboratoriów referencyjnych, norm krajowych oraz centrów pilotażowych. Jest to bariera, która spowalnia komercjalizację i ogranicza eksport.

Aby polski sektor nanotechnologii mógł wejść na poziom międzynarodowy, konieczne jest stworzenie systemu bezpieczeństwa nano, obejmującego certyfikację, ekotoksykologię, normy środowiskowe, krajowe wytyczne BHP oraz edukację społeczną. Oczekiwane zmiany regulacyjne do 2035 roku uczynią ten element niezbędnym dla konkurencyjności polskich firm.

ROZDZIAŁ 10 – Strategiczne kierunki rozwoju nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce do 2035 roku – wizja, fundamenty technologiczne, priorytety systemowe i mapa transformacji

Rozwój nanotechnologii i materiałów zaawansowanych jest jednym z najważniejszych obszarów globalnej transformacji technologicznej. Współczesne gospodarki budują swoją konkurencyjność na innowacjach materiałowych, zdolności do tworzenia rozwiązań o wyjątkowych parametrach fizycznych oraz na umiejętności integracji nauki z przemysłem. Dziś przewagę zdobywają te państwa, które rozwinęły pełne łańcuchy wartości materiałowych, obejmujące badania podstawowe, syntezę materiałów, testowanie, pilotaże przemysłowe, produkcję oraz komercjalizację eksportową.

Polska znajduje się na przecięciu tych procesów. Dysponuje bardzo silną bazą akademicką i badawczą, dynamicznie rosnącym ekosystemem firm, licznymi laboratoriami analitycznymi oraz zapleczem przemysłowym w branżach, które naturalnie wykorzystują nanotechnologię, w tym energetyce, budownictwie, ochronie środowiska, rolnictwie czy medycynie. Jednak struktura rozwoju jest asymetryczna: nauka jest bardzo silna, natomiast przemysł i infrastruktura wciąż pozostają w tyle.

Strategiczne kierunki rozwoju do 2035 roku muszą więc uwzględniać zarówno te mocne fundamenty, jak i aktualne luki. Polska nie musi – i nie powinna – konkurować z krajami, które posiadają gigantyczny kapitał inwestycyjny i ogromną skalę produkcji, takimi jak Korea Południowa, USA czy Japonia. Polska może natomiast stać się europejskim liderem w wybranych niszach technologicznych, budując swoją przewagę na wysokiej jakości badań, specjalistycznych kompetencjach i elastyczności małych oraz średnich przedsiębiorstw.

10.1. Wizja rozwoju: od silnej nauki do przemysłu materiałowego

Polska powinna przyjąć w perspektywie 2035 roku jasną wizję: stać się krajem, który przekształca potencjał naukowy w konkurencyjną produkcję wysokomarżowych technologii materiałowych. Oznacza to konieczność przejścia z modelu, w którym dominują badania podstawowe, do modelu opartego na komercjalizacji, wdrożeniach, centrach pilotażowych i eksporcie technologii.

Kluczowym elementem tej wizji jest rozwój pełnych łańcuchów wartości materiałowych, obejmujących syntezę nano, projektowanie materiałów, laboratoria specjalistyczne, centra pilotażowe TRL 6–9, jednostki certyfikujące oraz podmioty przemysłowe zdolne do produkcji i sprzedaży globalnej. Dziś Polska posiada tylko fragmenty takiego łańcucha, dlatego strategia musi skupić się na jego scaleniu.

10.2. Fundamenty technologiczne i pola kompetencji jako baza strategii

Wszystkie analizy wskazują, że Polska ma światowej klasy kompetencje w kilku określonych obszarach. Wyróżniają się powłoki funkcjonalne i inżynieria powierzchni, materiały środowiskowe, technologie fotokatalityczne, nanoagro, nanokompozyty oraz drukowana elektronika. Polska nie powinna próbować rozwijać wszystkiego – przeciwnie, powinna skoncentrować się na tych obszarach, w których ma przewagę naukową, rosnące zapotrzebowanie rynkowe oraz potencjał wdrożeniowy.

Powłoki funkcjonalne stanowią jeden z najbardziej dojrzałych sektorów polskiego rynku. Wynika to zarówno z kompetencji jednostek takich jak Politechnika Śląska i AGH, jak i z działalności firm specjalizujących się w nanometalach i powłokach antybakteryjnych. Materiały środowiskowe są drugim obszarem, w którym Polska może zbudować przewagę międzynarodową, ponieważ świat stoi przed gwałtownie rosnącym popytem na adsorbenty, membrany filtracyjne, kompozyty magnetyczne i materiały do oczyszczania powietrza. Z kolei nanoagro rośnie w tempie kilkunastu procent rocznie, a Polska posiada unikalne kompetencje w nano-ZnO i nanosensorach glebowych.

Strategia do 2035 roku powinna więc bazować na specjalizacjach, które łączą silne kompetencje naukowe z wysokim potencjałem komercjalizacji i eksportu.

10.3. Systemowe luki rozwojowe, które wymagają interwencji

Największym problemem polskiego ekosystemu nano są luki strukturalne. Polska nauka jest bardzo silna w obszarze badań TRL 1–4, natomiast zdolność do realizacji projektów TRL 6–9 jest ograniczona praktycznie do pojedynczych instytucji. Brakuje centrów pilotażowych pozwalających na produkcję nanomateriałów i powłok w skali przemysłowej, brakuje laboratoriów certyfikacji zgodnych z normami OECD, brakuje także systemowego finansowania etapów przejściowych między nauką a przemysłem.

Drugim obszarem, który wymaga interwencji, jest fragmentacja ekosystemu. Instytuty PAN, Sieć Łukasiewicz, uczelnie, firmy i klastry działają zbyt rozproszenie, bez jasnej platformy koordynacji. W wielu przypadkach te same badania są powtarzane przez różne jednostki, podczas gdy brakuje infrastruktury wdrożeniowej.

Trzecią luką jest brak dużych firm materiałowych zdolnych do absorpcji technologii nano. W wielu krajach rola takich przedsiębiorstw jest kluczowa – to one finansują pilotaże, prowadzą certyfikację, budują linie produkcyjne, odpowiadają za eksport i długoterminowe partnerstwa z biznesem globalnym.

10.4. Priorytety strategiczne na lata 2025–2035

Aby wzmocnić sektor nano, Polska powinna skoncentrować się na pięciu priorytetach systemowych.

Po pierwsze, stworzeniu ogólnokrajowej strategii materiałowej. Żaden rozwinięty kraj nie rozwija materiałów w sposób spontaniczny; wszędzie jest to proces zaplanowany, koordynowany centralnie i wsparty finansowaniem publicznym. W Niemczech od lat funkcjonuje Materials 2030, w Korei – Materials and Components Strategy, a w Japonii – Industrial Materials Vision. Polska również potrzebuje analogicznego dokumentu.

Po drugie, budowie centrów pilotażowych TRL 6–9. Bez nich nie powstanie żadna nowa firma materiałowa na skalę przemysłową. To centra, w których technologia przechodzi z fazy laboratoryjnej do produkcji przemysłowej. Centra te muszą być neutralne, dostępne zarówno dla instytutów, jak i firm, oraz wyposażone w aparaturę do syntezy, powlekania, testów środowiskowych i certyfikacji.

Po trzecie, utworzeniu krajowego laboratorium certyfikacji nanomateriałów i eco-tox. To warunek konieczny dla eksportu. Dziś polskie firmy muszą korzystać z zagranicznych laboratoriów, co znacząco zwiększa koszty i wydłuża czas certyfikacji.

Po czwarte, stworzeniu instrumentów finansowania skalowania materiałów. Wymagają one inwestycji rzędu kilkunastu milionów złotych, które są zbyt duże dla start-upów i zbyt ryzykowne dla tradycyjnych inwestorów.

Po piąte, integracji nauki i przemysłu. Musi powstać realny mechanizm współpracy, w którym projekty naukowe od początku są tworzone we współpracy z biznesem, a przemysł angażuje się w badania już na etapie TRL 3–4.

10.5. Mapa transformacji technologicznej i jej etapy

Transformacja polskiego sektora nano powinna przebiegać w trzech głównych etapach.

Pierwszy etap obejmuje lata 2025–2027 i ma charakter przygotowawczy. W tym okresie powinna powstać strategia materiałowa, przeprowadzony powinien zostać audyt infrastruktury, a także powołana instytucja odpowiedzialna za koordynację sektora. Ważne jest również rozpoczęcie budowy systemu normy krajowych oraz przygotowanie koncepcji centrów pilotażowych.

Drugi etap, przypadający na lata 2027–2030, powinien obejmować rozwój infrastruktury, budowę centrów pilotażowych, wzmocnienie finansowania TRL 6–9 oraz rozwój partnerstw przemysłowych. To kluczowy moment, w którym Polska zaczyna generować pierwsze produkty i technologie gotowe do komercjalizacji na dużą skalę.

Trzeci etap, obejmujący lata 2030–2035, powinien prowadzić do konsolidacji firm nano, tworzenia przedsiębiorstw działających na rynkach międzynarodowych oraz rozwijania eksportu. Polska powinna wejść w tym czasie do roli regionalnego centrum materiałowego w Europie Środkowej.

10.6. Technologiczne megatrendy, które ukształtują polską strategię

Na horyzoncie rozwoju materiałów widnieje kilka kluczowych megatrendów, które będą determinować wybór specjalizacji strategicznych.

Jednym z najważniejszych jest materiałoznawstwo obliczeniowe i wykorzystanie sztucznej inteligencji w projektowaniu materiałów. To obszar, który może zrewolucjonizować sposób syntezy i testowania nanomateriałów, skracając czas rozwoju technologii o połowę. Polska powinna rozwijać narzędzia AI do projektowania materiałów oraz tworzyć cyfrowe bliźniaki procesów chemicznych.

Drugim megatrendem jest wzrost zapotrzebowania na materiały środowiskowe. Regulacje UE dotyczące jakości powietrza i wody, emisji z przemysłu oraz oczyszczania ścieków sprawiają, że popyt na nanoadsorbenty, membrany filtracyjne i nanokompozyty będzie rosł przez kolejne dekady.

Trzecim megatrendem jest transformacja energetyczna. Rozwój OZE, magazynowania energii i technologii wodorowych wymaga materiałów kompozytowych, powłok antykorozyjnych, katalizatorów nano oraz membran. Polska powinna pozycjonować się w tym obszarze.

Czwartym megatrendem jest rozwój agro-nano, który może przynieść poprawę efektywności rolnictwa i ograniczyć zużycie nawozów o kilkadziesiąt procent.

10.7. Rekomendacje końcowe dla Polski do 2035 roku

Polska powinna skoncentrować się na kilku kluczowych działaniach systemowych. Są to tworzenie krajowej strategii materiałowej, budowa centrów pilotażowych, wzmocnienie finansowania TRL 6–9, rozwój laboratoriów certyfikacyjnych i wdrożenie nowych mechanizmów współpracy nauka–biznes. Równolegle należy wspierać eksport technologii, rozwijać partnerstwa międzynarodowe i specjalizować się w niszach, które mają największy potencjał globalny.

10.8. Podsumowanie

Polska stoi przed szansą wejścia do grona państw, które odgrywają znaczącą rolę w globalnym rynku nanotechnologii. Aby jednak to osiągnąć, musi przestawić swój ekosystem z trybu naukowego na tryb wdrożeniowy, inwestując w infrastrukturę pilotażową, certyfikacyjną i finansową.

Strategiczne kierunki rozwoju do 2035 roku obejmują powłoki funkcjonalne, materiały środowiskowe, nanoagro, nanokompozyty oraz drukowaną elektronikę. To obszary, w których Polska może nie tylko konkurować, ale także wygrywać, pod warunkiem, że działania systemowe będą skoordynowane, konsekwentne i wspierane przez odpowiednie instrumenty finansowe oraz regulacyjne.

ROZDZIAŁ 11 - Perspektywy rozwoju nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce do 2035 roku: podsumowanie transformacji, kierunki długoterminowe, implikacje gospodarcze oraz rekomendacje dla państwa, nauki i biznesu

Nanotechnologie oraz materiały zaawansowane znajdują się w centrum globalnych przemian technologicznych, które mają kluczowe znaczenie dla przyszłości przemysłu, energetyki, ochrony środowiska, medycyny oraz rolnictwa. Polska, dysponująca jedną z największych i najbardziej aktywnych baz naukowych w Europie Środkowo-Wschodniej, stoi przed możliwością zbudowania trwałej pozycji w kilku strategicznych segmentach tej gospodarki. Warunkiem osiągnięcia tej pozycji jest jednak przekształcenie modelu rozwoju z obecnego układu opartego głównie na badaniach podstawowych i projektach akademickich w system, który pozwala na pełną komercjalizację materiałów, ich certyfikację oraz skalowanie do produkcji przemysłowej.

Przed Polską stoi zadanie stworzenia ram strategicznych i instytucjonalnych, które umożliwią rozwój zaawansowanych technologii materiałowych z korzyścią dla krajowej gospodarki. To proces długotrwały, wymagający integracji polityk publicznych, działalności naukowej, udziału dużych firm przemysłowych oraz dynamicznego sektora MŚP. Rozwój nanotechnologii przyniesie korzyści zarówno w wymiarze gospodarczym, jak i środowiskowym, a także pozwoli na budowę nowych przewag konkurencyjnych.

11.1. Transformacja strukturalna jako kluczowy warunek rozwoju

Wszystkie analizy przeprowadzone w poprzednich rozdziałach prowadzą do jednoznacznego wniosku: rozwój nanotechnologii w Polsce wymaga transformacji strukturalnej całego ekosystemu. Obecnie dysproporcja między silną nauką a słabszym przemysłem wdrożeniowym jest znacząca. Polska jest jednym z liderów badań naukowych, zwłaszcza w obszarach materiałów środowiskowych, powłok funkcjonalnych, nanoagro i kompozytów, ale konkurencyjność globalna wymaga infrastruktury TRL 6–9, której brak ogranicza zdolność kraju do produkcji i eksportu.

Transformacja ta powinna objąć budowę centrów pilotażowych i certyfikacyjnych, rozwój laboratoriów toksykologii nano, a także stworzenie strategii państwowej, która łączy działania nauki, przemysłu i administracji. Kraje, które odniosły sukces w sektorze materiałów, takie jak Niemcy, Korea czy Japonia, stosują podejście systemowe, w którym państwo pełni funkcję koordynatora i katalizatora, zapewniając warunki do rozwoju całego ekosystemu.

Polska powinna podążać podobną drogą, tworząc warunki do zbudowania silnego przemysłu materiałowego, który uzupełni potencjał akademicki.

11.2. Znaczenie specjalizacji narodowych w budowie przewagi technologicznej

Aby Polska mogła konkurować globalnie, musi skupić się na wąskich specjalizacjach, które mają największe szanse na szybki wzrost popytu, umiarkowane bariery wejścia oraz możliwość zdobycia pozycji lidera. Analiza przeprowadzona w rozdziałach 4–10 pokazuje, że do takich obszarów należą powłoki funkcjonalne, materiały środowiskowe, agro-nano, materiały kompozytowe oraz drukowana elektronika.

Powłoki funkcjonalne są jednym z najbardziej obiecujących sektorów ze względu na ich szerokie zastosowanie w budownictwie, medycynie, elektronice, motoryzacji i sektorze przemysłowym. Polska posiada zaawansowane kompetencje w zakresie syntezy nanometali, inżynierii powierzchni oraz projektowania powłok o właściwościach antybakteryjnych, fotokatalitycznych i ochronnych. Rozwój tego sektora pozwoli Polsce na zajęcie mocnej pozycji w europejskim łańcuchu wartości.

Materiały środowiskowe mają jeszcze większy potencjał. Globalne przepisy dotyczące jakości powietrza i wody oraz obowiązek redukcji zanieczyszczeń przemysłowych sprawiają, że popyt na nanoadsorbenty, membrany filtracyjne, katalizatory i nanokompozyty będzie rosł przez dekady. Polska ma tu wyjątkowo silne kompetencje badawcze i liczne patentowe rozwiązania.

W obszarze nanoagro kraj dysponuje unikalnymi kompetencjami dzięki badaniom nad nano-ZnO, nanosensorycznymi i nawozami o kontrolowanym uwalnianiu. Zmiany klimatyczne, rosnące koszty produkcji żywności oraz presja środowiskowa stwarzają tu ogromne możliwości rynkowe.

Drukowana elektronika oraz nanosensoryczne technologie stanowią segment zaawansowany technologicznie, w którym Polska posiada firmy o globalnym zasięgu. Kontynuowanie inwestycji w ten sektor może przynieść wysokomarżowe wdrożenia.

11.3. Integracja nauki i przemysłu jako kluczowy czynnik sukcesu

Zdolność do komercjalizacji nanotechnologii zależy od tego, czy nauka będzie w stanie współpracować z przemysłem na wszystkich etapach cyklu życia materiałów. Obecnie współpraca ta jest zbyt słaba. Naukowcy koncentrują się na badaniach publikacyjnych, a firmy nie mają możliwości finansowania pilotaży i certyfikacji. W rezultacie wiele technologii nano o wysokim potencjale zatrzymuje się na etapie TRL 4–5.

Aby to zmienić, Polska potrzebuje platform współpracy i mechanizmów finansowych, które pozwolą na tworzenie projektów wspólnych od początkowych etapów badawczych aż po komercjalizację. Modele takie stosują Niemcy (Fraunhofer), Holandia (TNO) i Korea (KIER). W każdym przypadku istnieje instytucja pomostowa, której rolą jest pełna integracja nauki i przemysłu.

W Polsce taką rolę częściowo mogą pełnić Sieć Łukasiewicz i klastry technologiczne, jednak wymagają one wzmocnienia i jasnej strategii działania. Rozwój takich instytucji jest jednym z najważniejszych elementów perspektywy 2035.

11.4. Infrastruktura pilotażowa i certyfikacyjna jako kluczowy brak w ekosystemie

Brak infrastruktury pilotażowej i certyfikacyjnej jest największym ograniczeniem rozwoju polskiej nanotechnologii. Bez centrów pilotażowych, które umożliwią przejście technologii z laboratoriów do skali przemysłowej, żaden rynek materiałowy nie może się rozwijać. W krajach wiodących tego typu centra wyposażone są w urządzenia do syntezy, funkcjonalizacji, powlekania, kompozytowania oraz testów środowiskowych i toksykologicznych.

Polska nie dysponuje ani dużą instalacją pilotażową, ani krajowym laboratorium certyfikacji nanomateriałów. Oznacza to, że firmy muszą prowadzić badania bezpieczeństwa za granicą, co wynika w długich cyklach wdrożeń i wyższych kosztach.

Jeżeli Polska chce stać się liderem w wybranych sektorach, musi zainwestować w infrastrukturę pilotażową, która stanie się rdzeniem polityki materiałowej kraju. Jej brak uniemożliwia skalowanie produkcji, a tym samym rozwój firm materiałowych.

11.5. Znaczenie regulacji i bezpieczeństwa dla konkurencyjności Polski

Regulacje europejskie dotyczące nanotechnologii są jednymi z najbardziej restrykcyjnych na świecie. Ich celem jest zapewnienie bezpieczeństwa zdrowotnego i środowiskowego, ale jednocześnie podnoszą barierę wejścia na rynek. Kraje takie jak Niemcy, Holandia czy Francja posiadają własne centra referencyjne, które ułatwiają krajowym firmom certyfikację produktów.

Polska znajdując się poza takim systemem jest zmuszona do korzystania z zagranicznych laboratoriów, co osłabia jej konkurencyjność. Aby móc rozwijać eksport i komercjalizować technologie nano, konieczne jest stworzenie krajowych laboratoriów certyfikacyjnych zgodnych z normami OECD.

11.6. Międzynarodowa pozycja Polski i szanse eksportowe

Potencjał eksportowy polskich nanotechnologii jest znaczący. Segmenty takie jak powłoki funkcjonalne, materiały środowiskowe, nanokompozyty i nanoagro mają duże szanse sprzedaży na rynkach europejskich, azjatyckich i południowoamerykańskich.

Aby ten potencjał wykorzystać, potrzebne są jednak mechanizmy wsparcia eksportu, misje gospodarcze, dostęp do certyfikacji oraz promocja polskich rozwiązań. W szczególności rynek azjatycki może stać się głównym odbiorcą nano-ZnO, powłok ochronnych i materiałów środowiskowych.

11.7. Gospodarcze znaczenie sektora nanotechnologii do 2035 roku

Nanotechnologie mogą stać się jednym z najważniejszych motorów rozwoju gospodarczego Polski. Przynoszą korzyści w wielu sektorach, pomagają tworzyć wysokomarżowe produkty,

wspierają transformację energetyczną i środowiskową, a także zwiększają konkurencyjność przemysłu.

W perspektywie 2035 roku mogą przyczynić się do powstania nowych branż, takich jak:

- materiałoznawstwo cyfrowe,
- elektronika drukowana,
- nanoagro,
- materiały środowiskowe nowej generacji,
- kompozyty inteligentne,
- powłoki adaptacyjne.

Każda z tych branż może generować tysiące miejsc pracy oraz stanowić nowy filar eksportowy.

11.8. Rekomendacje długoterminowe dla Polski

Polska musi skupić się na działaniach systemowych, które wprowadzą sektor materiałowy na wyższy poziom. Najważniejsze jest opracowanie krajowej strategii materiałowej, powołanie jednostki koordynacyjnej ds. nanotechnologii, budowa laboratoriów referencyjnych i centrów pilotażowych oraz integracja nauki i przemysłu.

Równocześnie konieczne jest wsparcie eksportu, rozwój partnerstw międzynarodowych i stworzenie długoterminowego systemu finansowania TRL 6–9.

11.9. Podsumowanie

Perspektywa rozwoju nanotechnologii i materiałów zaawansowanych w Polsce do 2035 roku jest bardzo obiecująca, ale wymaga podjęcia zdecydowanych działań systemowych i inwestycyjnych. Polska posiada znakomitą bazę naukową, rosnące kompetencje przemysłowe i unikalny potencjał w kilku kluczowych obszarach. Jeżeli kraj skoncentruje się na budowie pełnych łańcuchów wartości, inwestycji w infrastrukturę pilotażową oraz rozwój mechanizmów certyfikacyjnych, może stać się liderem w europejskim sektorze materiałowym.

Najważniejszym elementem będzie konsekwentne budowanie ekosystemu, który pozwoli przekształcić siłę badań naukowych w realne wdrożenia i produkty wysokiej wartości dodanej. To właśnie w tej zdolności – przejścia od nauki do przemysłu – leży klucz do przyszłego sukcesu polskiej nanotechnologii.

ROZDZIAŁ 12 – Podsumowanie, wnioski strategiczne oraz kierunki dalszych działań rozwojowych dla polskiego sektora nanotechnologii i materiałów zaawansowanych do 2035 roku

Nanotechnologie i materiały zaawansowane stanowią fundament nowoczesnych gospodarek, wpływając jednocześnie na rozwój energetyki, transportu, elektroniki, rolnictwa, medycyny, budownictwa oraz sektorów środowiskowych. Polska znajduje się w wyjątkowym momencie, w którym jej potencjał naukowy, kompetencje technologiczne i rosnące zapotrzebowanie gospodarki spotykają się z globalnym trendem transformacji materiałowej. Z jednej strony tworzy to ogromną szansę na zajęcie znaczącego miejsca w europejskich i światowych łańcuchach wartości, a z drugiej – ujawnia głębokie strukturalne braki, które mogą hamować rozwój, jeśli nie zostaną odpowiednio zaadresowane.

W niniejszym raporcie przedstawiono analizę całego polskiego ekosystemu nanotechnologii: od potencjału naukowego, przez strukturę rynku, trendy sektorowe, regulacje, infrastrukturę, finansowanie i zdolność eksportową, aż po ryzyka i rekomendacje systemowe. Obraz, który wyłania się z tej analizy, wskazuje jednoznacznie, że Polska posiada realne predyspozycje, aby w ciągu najbliższej dekady stać się liderem w wybranych niszach technologicznych, szczególnie w obszarach materiałów środowiskowych, powłok funkcjonalnych, nanoagro, kompozytów i drukowanej elektroniki. Jednak, aby ten potencjał został wykorzystany, konieczne są działania państwa, przemysłu i środowiska naukowego o charakterze systemowym.

12.1. Polska na tle świata – pozycja, która może zostać wzmocniona

Polska posiada jedną z największych i najbardziej aktywnych baz naukowych w Europie Środkowo-Wschodniej. Badania prowadzone przez instytuty PAN, Sieć Łukasiewicz i największe uczelnie techniczne plasują kraj w czołówce europejskiej pod względem liczby publikacji w obszarze materiałów zaawansowanych i nanotechnologii. Polska wyróżnia się zwłaszcza w badaniach materiałów środowiskowych, fotokatalitycznych, powłok funkcjonalnych oraz nanoagro. Jednocześnie kraj dysponuje firmami, które zyskały globalne uznanie, szczególnie w obszarze drukowanej elektroniki.

Jednak mimo tych przewag Polska pozostaje daleko za Niemcami, Holandią, Koreą Południową, Japonią i USA w zakresie infrastruktury pilotażowej, certyfikacji, produkcji materiałów w skali przemysłowej oraz integracji nauki z biznesem. Oznacza to, że przewaga Polski opiera się bardziej na wiedzy niż na zdolności jej wdrażania. Aby kraj mógł realnie konkurować, musi zmienić strukturalne fundamenty ekosystemu innowacji materiałowych.

12.2. Transformacja systemowa jako warunek wejścia na poziom globalny

Najważniejszym wnioskiem z całego raportu jest potrzeba przeprowadzenia transformacji systemowej, obejmującej zarówno infrastrukturę, jak i instytucje. Polska, aby zbudować

prawdziwie konkurencyjny sektor materiałowy, musi rozwinąć pełne łańcuchy wartości, które obejmują badania podstawowe, projektowanie materiałów, ich syntezę, testy analityczne, pilotaże przemysłowe, certyfikację, skalowanie i eksport.

Obecnie kraj dysponuje silnym segmentem badań podstawowych i stosowanych, jednak brakuje infrastruktury TRL 6–9, laboratoriów OECD, centrów pilotażowych, systemów akredytacji oraz długoterminowych instrumentów finansowania komercjalizacji. Bez tych elementów Polska może utracić swoją przewagę konkurencyjną, a obiecujące technologie nano będą pozostawać w laboratoriach, zamiast trafiać na rynek.

12.3. Znaczenie specjalizacji narodowych i nisz strategicznych

Jednym z kluczowych wniosków jest fakt, że Polska nie musi próbować konkurować we wszystkich segmentach nanotechnologii, ale powinna skoncentrować się na kilku niszach, które są zgodne z globalnymi megatrendami i w których posiada rzeczywiste przewagi. Do najważniejszych należą:

- powłoki funkcjonalne,
- materiały środowiskowe,
- nanoagro,
- kompozyty i materiały hybrydowe,
- drukowana elektronika i nanosensory.

Te specjalizacje odpowiadają na kluczowe potrzeby świata, a ich potencjał rynkowy rośnie z roku na rok. Jednocześnie wpisują się one w polskie kompetencje naukowe i przemysłowe, co czyni je najbardziej realistycznymi kierunkami rozwoju na najbliższą dekadę.

12.4. Rola państwa jako koordynatora i katalizatora zmian

Aby polski sektor nanotechnologii osiągnął poziom globalny, kluczowa będzie rola państwa. Nie chodzi tu o bezpośrednie budowanie firm czy prowadzenie badań, ale o stworzenie warunków, które umożliwią rozwój sektora. Państwo powinno zatem:

- stworzyć krajową strategię materiałową,
- powołać instytucję odpowiedzialną za koordynację działań,
- zainwestować w laboratoria referencyjne,
- stworzyć centra pilotażowe TRL 6–9,
- rozwinąć instrumenty finansowania komercjalizacji,
- wesprzeć eksport technologii poprzez misje gospodarcze i programy wsparcia.

Bez takiego wsparcia sektor nie będzie w stanie przejść z etapu badań do etapu wdrożeń.

12.5. Nauka jako źródło innowacji – konieczność wzmocnienia współpracy z przemysłem

Polska nauka jest jednym z głównych atutów kraju, ale jej potencjał nie jest w pełni wykorzystywany przez przemysł. Aby zmienić tę sytuację, konieczne jest stworzenie systemów współpracy nauka–biznes, które obejmują wspólne laboratoria, długoterminowe projekty wdrożeniowe, otwarte platformy infrastrukturalne oraz systemy współfinansowania badań. Polska może tu inspirować się modelem Fraunhofera, TNO i japońskich instytutów materiałowych.

Integracja nauki z przemysłem pozwoli na skrócenie cyklu rozwoju technologii i umożliwi firmom wejście na wyższy poziom wartości dodanej.

12.6. Przemysł jako motor komercjalizacji

Rozwój sektora materiałowego wymaga zaangażowania dużych firm przemysłowych, które będą w stanie pełnić rolę inwestorów, partnerów technologicznych i odbiorców końcowych. Polska dysponuje silnymi sektorami: energetyką, chemicznym, budowlanym, motoryzacyjnym i żywnościowym. To one powinny stać się odbiorcami technologii nano i motorami ich wdrażania.

Jednym z kluczowych wyzwań jest jednak brak dużych przedsiębiorstw materiałowych w Polsce. Aby to zmienić, konieczne są zachęty dla inwestycji przemysłowych w obszarach wysokich technologii, w tym wsparcie CVC, partnerstw strategicznych oraz budowy nowych linii produkcyjnych.

12.7. Znaczenie infrastruktury dla przyszłej konkurencyjności

W dalszej perspektywie kluczową przewagą każdego państwa będzie jakość jego infrastruktury materiałowej. Polska musi zainwestować w laboratoria certyfikacyjne, centra pilotażowe i instalacje półtechniczne. Bez nich kraj nie będzie w stanie rozwijać produkcji materiałów w skali przemysłowej, a wszystkie przewagi naukowe pozostaną niewykorzystane.

Infrastruktura ta będzie pełnić rolę platformy, na której będą rozwijać się nowe firmy, technologie i kierunki badawcze.

12.8. Rola regulacji i bezpieczeństwa w budowie zaufania rynkowego

Regulacje UE stanowią wyzwanie dla sektora, ale jednocześnie zapewniają wysoki poziom bezpieczeństwa i podnoszą standardy jakości. Polska musi rozwijać systemy oceny ryzyka, laboratoria ekotoksykologiczne oraz normy krajowe, aby zapewnić zgodność z europejskimi wymogami.

Sektor, który będzie w stanie zapewnić najwyższe standardy bezpieczeństwa, zyska większe zaufanie odbiorców i przewagę na rynku.

12.9. Znaczenie eksportu jako miernika dojrzałości sektora

Zdolność do eksportu zaawansowanych materiałów będzie najlepszym dowodem dojrzałości technologicznej Polski. Sektory takie jak powłoki funkcjonalne, materiały środowiskowe i nanoagro mają szczególnie duży potencjał sprzedaży międzynarodowej.

Polska powinna rozwijać misje gospodarcze, programy wsparcia eksportu, certyfikację międzynarodową oraz partnerstwa z krajami spoza UE, które wykazują duże zapotrzebowanie na nowe materiały.

12.10. Podsumowanie końcowe

Polska ma szansę wejść do grona państw, które w ciągu najbliższej dekady zbudują silny, konkurencyjny sektor materiałów zaawansowanych. Dysponuje silnym potencjałem naukowym i dobrze rozwijającymi się firmami, ale aby w pełni wykorzystać tę szansę, potrzebuje spójnej, systemowej strategii.

Rozwój nanotechnologii nie jest procesem spontanicznym – to długoterminowe przedsięwzięcie wymagające spójnych działań państwa, nauki i biznesu. Inwestycje w infrastrukturę pilotażową, certyfikacyjną, badawczą i eksportową będą kluczowe dla przyszłej konkurencyjności.

Jeżeli Polska zdecyduje się na wdrożenie rozwiązań opisanych w tym raporcie, ma realną szansę stać się europejskim liderem w wybranych niszach materiałowych do 2035 roku.

BIBLIOGRAFIA

Dokumenty Unii Europejskiej i organizacji międzynarodowych

1. European Commission, “Recommendation on the definition of nanomaterial,” 2022.
2. European Chemicals Agency (ECHA), “Appendix R.6-1 for nanoforms applicable to the Guidance on QSARs and Grouping of Chemicals,” 2021.
3. European Food Safety Authority (EFSA), “Guidance on risk assessment of engineered nanomaterials,” 2021.
4. OECD, “Testing Programme on Manufactured Nanomaterials – Final Reports,” OECD Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN), 2020–2023.
5. European Commission, “Materials 2030 Manifesto,” Brussels, 2022.
6. Horizon Europe Work Programme 2023–2025, Cluster 4: Digital, Industry & Space.
7. JRC European Commission, “Nanotechnology in the EU: Market, Regulation and Science,” 2020.
8. European Union Observatory for Nanomaterials (EUON), “Nanomaterials in the EU Market,” annual reports 2020–2024.
9. REACH Regulation (EC) No 1907/2006 – updated annexes for nanoforms, 2020.
10. CLP Regulation (EC) No 1272/2008 – updates for nanomaterials classification.

Źródła rynkowe i przemysłowe

11. MarketWatch, “Global Nanotechnology Market Forecast 2025–2035,” 2023.
12. Allied Market Research, “Advanced Materials Market Outlook 2030,” 2022.
13. Markets&Markets, “Nanotechnology and Nanomaterials Market Report,” 2022–2024.
14. IDTechEx, “Printed Electronics and Functional Materials 2024–2034,” 2023.
15. McKinsey & Company, “The Future of Materials Engineering,” 2022.
16. Deloitte, “Materials of the Future – Industry Outlook 2030,” 2023.
17. Fraunhofer ISC, “European Nanomaterials Innovation Landscape,” 2023.

Źródła krajowe (Polska)

18. GUS – “Rocznik Statystyczny Przemysłu,” edycje 2020–2024.
19. GUS – “Nauka i Technika w Polsce,” edycje 2021–2024.
20. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju – raporty programowe 2020–2024.
21. PARP – “Trendbook Technologiczny,” wydania 2022–2024.
22. PAIH – “Polskie technologie materiałowe na rynkach zagranicznych,” 2023.
23. Sieć Badawcza Łukasiewicz – raporty instytutów: PORT, IMN, ICSO, 2020–2024.
24. OPI PIB – “Nauka Polska: statystyki i analiza potencjału B+R,” lata 2021–2024.
25. Krajowe Inteligentne Specjalizacje 2021–2027 (KIS 12 – Materiały Inteligentne).
26. Ministerstwo Rozwoju – “Przemysł 4.0. Polska mapa drogowa,” 2023.
27. NCN – Podsumowanie grantów w obszarze nauk chemicznych i materiałowych, 2020–2024.

Publikacje naukowe i eksperckie

28. P. J. Vikesland, “Nanomaterials in the Environment: Behavior, Risk and Monitoring,” Nature Nanotechnology, 2021.
29. R. Fadeel, “Safety Assessment of Nanomaterials: EU Perspective,” Nano Today, 2022.

30. M. Roco, "Nanotechnology Growth Across Regions," Journal of Nanoparticle Research, 2020.
31. H. Krug, "Nanotoxicology and Human Health," Materials Today, 2021.
32. T. Stark et al., "Advanced Functional Coatings: Market and Technology Outlook," Surface Engineering Reports, 2023.
33. J. Liu, "Nanomaterials for Water Treatment," Chemical Reviews, 2022.
34. OECD Science Brief: "Nanomaterials for Agriculture and Food," 2021.
35. XTPL S.A. – materiały techniczne i prasowe 2021–2024.

Polskie raporty dostarczone przez użytkownika (oficjalnie cytowane)

36. "Nanotechnologia i zaawansowane materiały w ochronie środowiska," – własna analiza
37. "Nanotechnologia w rolnictwie i produkcji żywności," – własna analiza

Normy, wytyczne i dokumenty techniczne

38. ISO/TS 80004 – vocabulary for nanotechnologies, parts 1–13.
39. ISO/TR 13014: Nanotechnologies – Guidance on physicochemical characterization.
40. ISO 10706 – Nanomaterials risk management.
41. OECD Test Guidelines for Manufactured Nanomaterials, 2020–2024.
42. ASTM E2456 – Standard terminology for nanotechnology.
43. WHO – "Guidance on Safe Handling of Nanomaterials," 2021.

Źródła branżowe i sektorowe w Polsce

44. Polskie Towarzystwo Materiałoznawstwa – komunikaty i raporty tematyczne 2020–2024.
45. Polskie Towarzystwo Nanotechnologiczne – materiały konferencyjne 2021–2024.
46. InterNanoPoland – publikacje i raporty pokonferencyjne 2018–2024.
47. Klastyry technologiczne (Silesian Nano Cluster, Klaster BioTech, Klaster Gospodarki Odpadowej) – materiały 2020–2024.
48. Instytut Chemii Fizycznej PAN – projekty z obszaru nano 2021–2024.
49. AGH – Centrum Materiałów Funkcjonalnych, raporty wewnętrzne 2020–2024.
50. Politechnika Śląska – badania i wdrożenia w obszarze inżynierii powierzchni, publikacje 2021–2024.

