

Kierunki rozwoju materiałów izolacyjnych kabli średnich i wysokich napięć

XXX Konferencja Szkoleniowo-Techniczna
Elektroenergetyczne Sieci Kablowe i Napowietrzne



Wydział
Inżynierii Mechanicznej
i Mechatroniki

Brighter Future
in Energy

TF.group



Agenda

- ⊙ **Materiały izolacyjne w kablach energetycznych – kierunki rozwoju**
 - ⊙ **Degradacja izolacji XLPE**
 - ⊙ **Badania rozwojowe materiału izolacyjnego**
 - ⊙ **Badanie kwalifikacyjne na skalowanych próbkach kabli**
 - ⊙ **Rozwój PP jako materiału izolacyjnego**
-

Wraz z rozwojem systemów elektroenergetycznych rośnie potrzeba udoskonalania XLPE oraz poszukiwania nowych alternatyw materiałów izolacyjnych oferujących większą wydajność, możliwość recyklingu i odporność na czynniki środowiskowe.

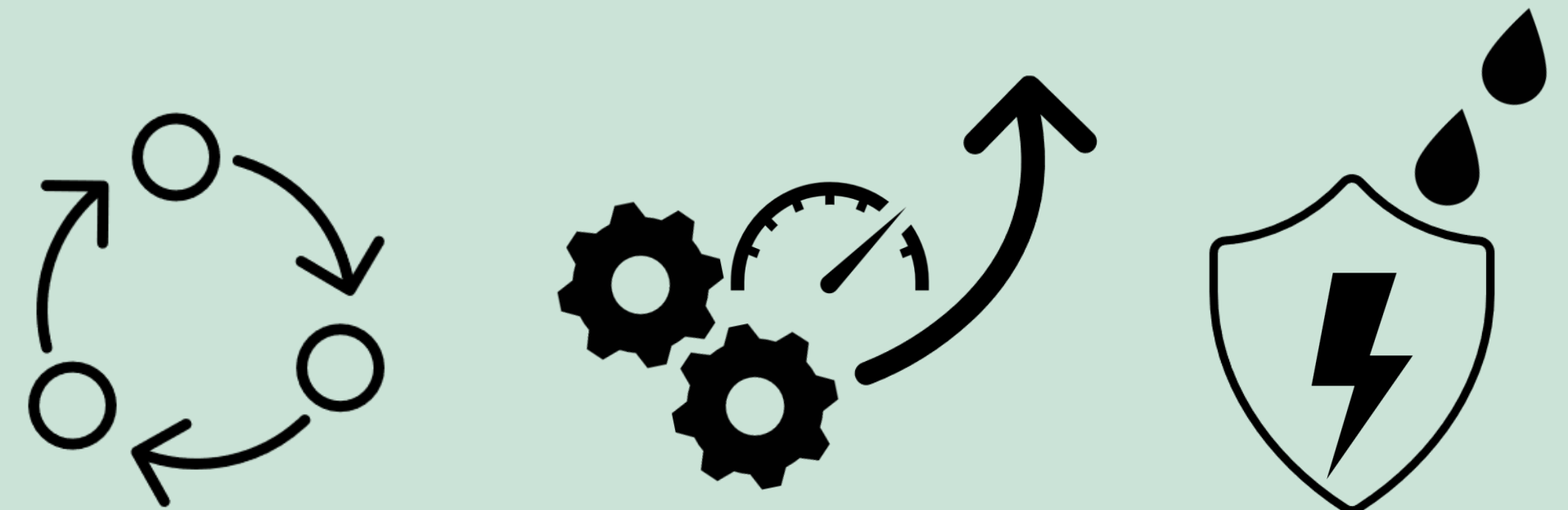
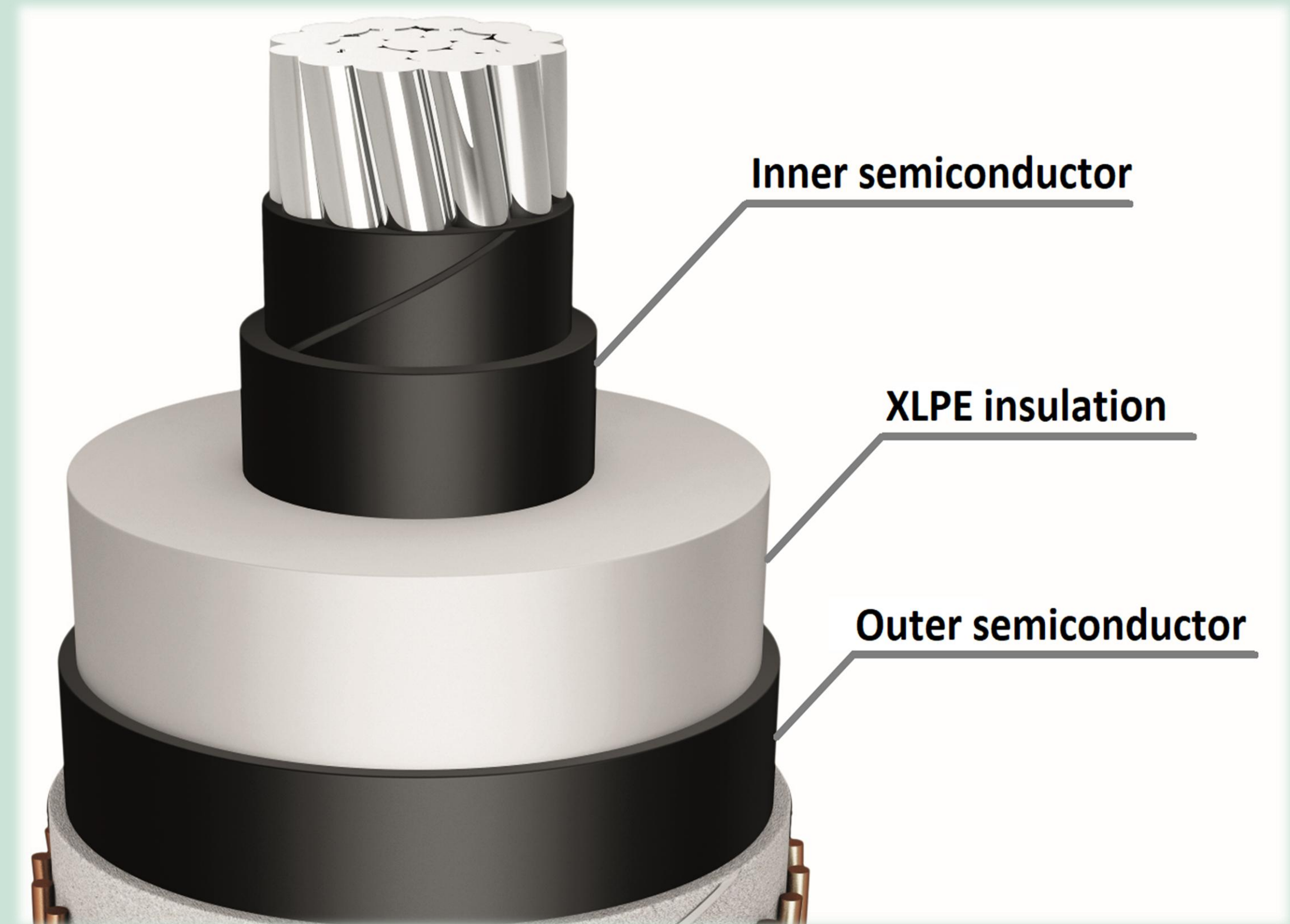
Główne kierunki rozwoju:

WTR-XLPE (water tree retardant XLPE)

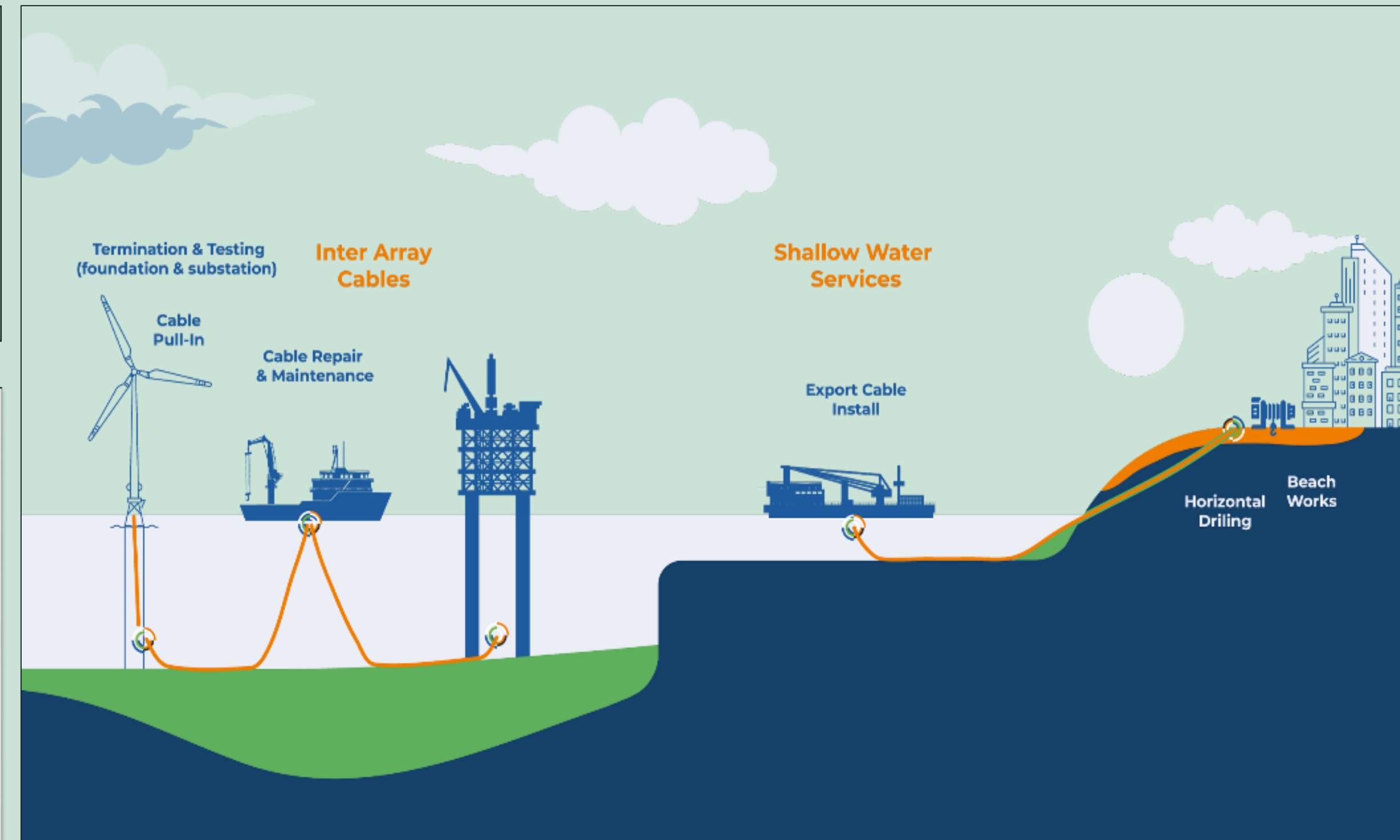
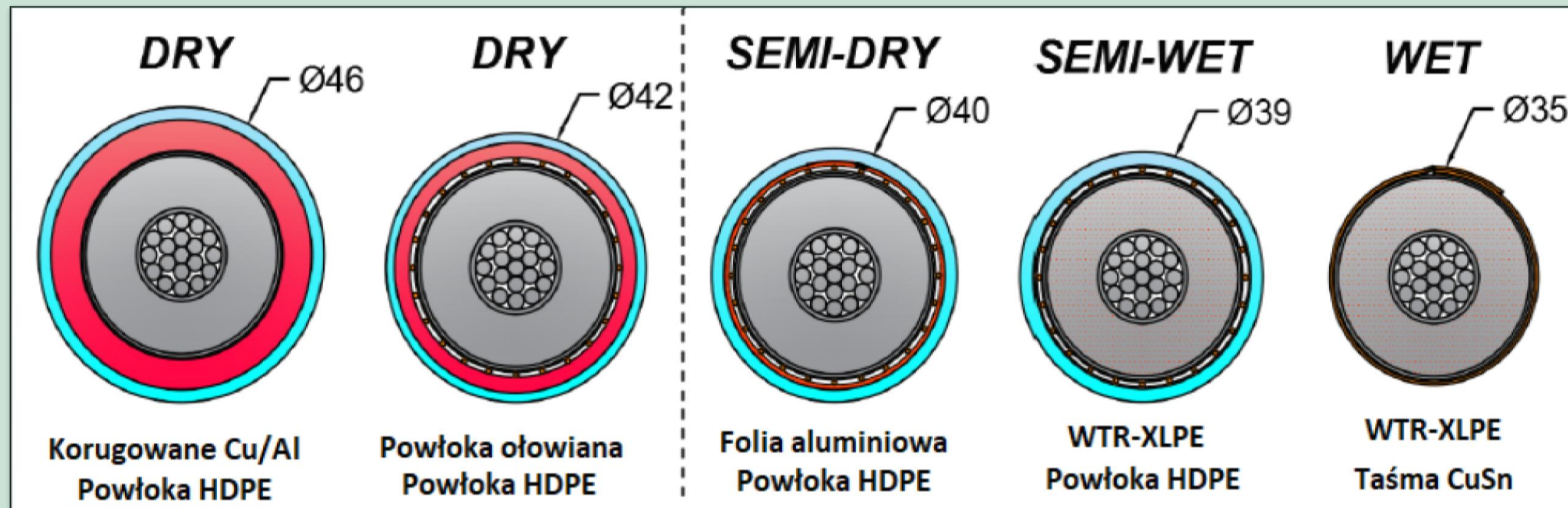
- Doskonała odporność na starzenie w warunkach wilgotnych
 - Powszechnie stosowany materiał o wysokiej efektywności produkcyjnej
- Wiodący materiał w kablach podmorskich o konstrukcji „wet” i „semi-wet”

PP (polipropylen)

- Wysoka odporność termiczna i mechaniczna
 - Brak akumulacji ładunków przestrzennych
 - Możliwość pełnego recyklingu
- Potencjalny, kluczowy materiał do przyszłych aplikacji kablowych
- Rozwój w kablach HVDC



Dynamiczny rozwój morskiej energetyki wiatrowej wymusza poszukiwania **nowych rozwiązań w zakresie konstrukcji podmorskich kabli elektroenergetycznych**
→ **odejście od tradycyjnych konstrukcji kabli podmorskich.**



Korzyści:

- **redukcja zużycia metali** (szczególnie Pb / Al) → niższa cena oraz masa kabla
- **redukcja masy kabla** → niższe koszty transportu i instalacji
- brak ołowiu → **zmniejszenie wpływu na środowisko**
- większa elastyczność konstrukcji kabli → **konstrukcje dedykowane FOW**
- **zmniejszenie śladu węglowego** na etapie pozyskiwania surowców oraz ich produkcji

Czynniki mające wpływ na starzenie układu izolacyjnego:

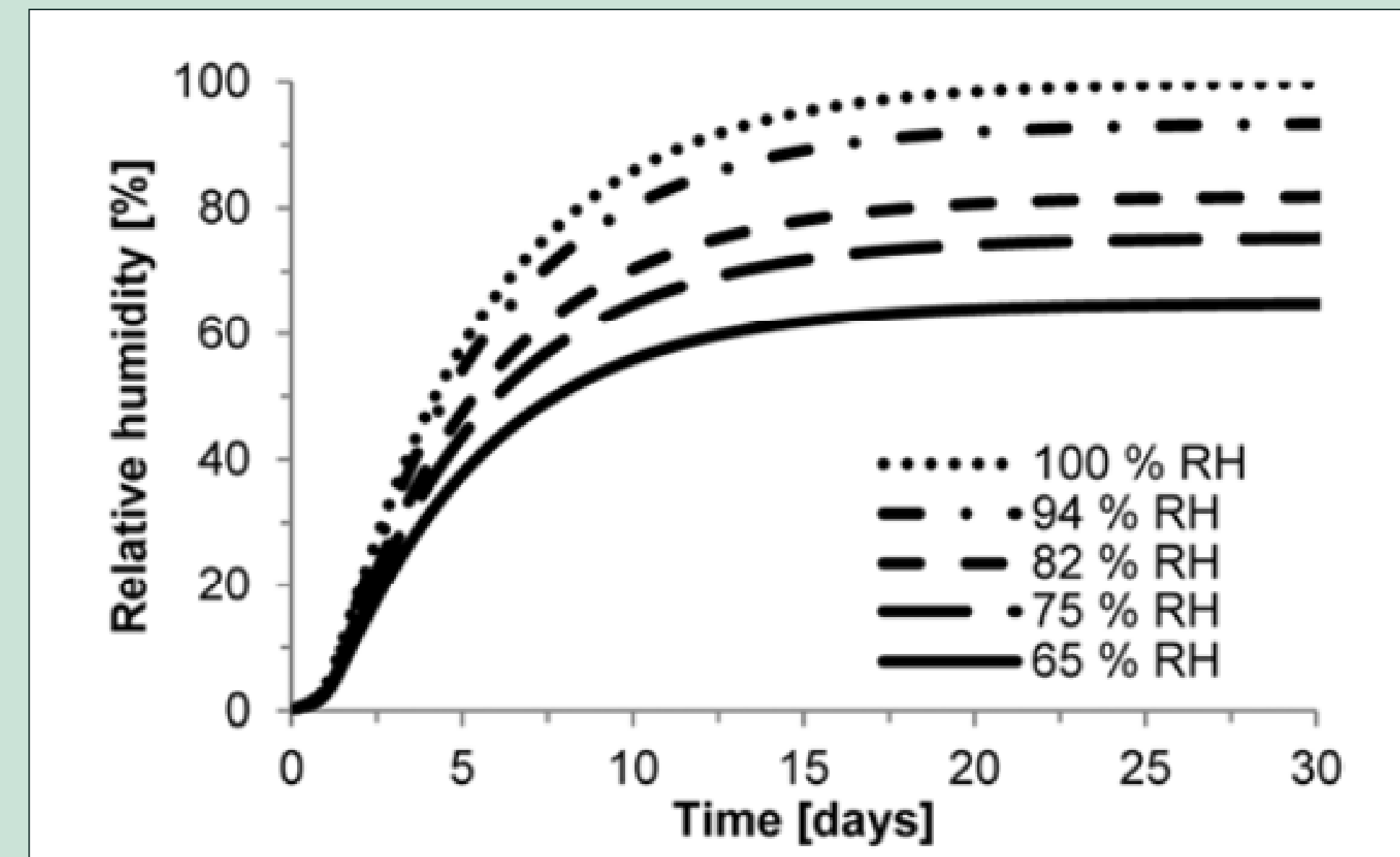
- **termiczne** – temperatura pracy, zbyt niska/wysoka temperatura otoczenia, gradient temperatur
- **elektryczne** – napięcie prądu zmiennego, stałego lub udarowego, częstotliwość napięcia
- **mechaniczne** – rozciąganie, zginanie, skręcanie, ściskanie
- **środowiskowe** – ekspozycja na działanie powietrza, wody, promieniowania UV

Drzewienie wodne ma wpływ na wytrzymałość elektryczną, współczynnik strat dielektrycznych, rezystancję izolacji oraz przenikalność dielektryczną izolacji kablowej.

Badania dotyczące inicjacji i wzrostu efektu drzewienia wodnego oraz doświadczenia eksploatacyjne wykazują, że największe znaczenie wśród czynników starzeniowych ma **obecność wilgoci** w materiale izolacyjnym.

Jeżeli wilgotność względna (RH) jest:

- < 70% nie następuje inicjacja drzewienia wodnego
- 70 ÷ 100% drzewienie wodne rozwija się w ograniczonym tempie
- > 100% drzewienie rozwija się w pełnym tempie



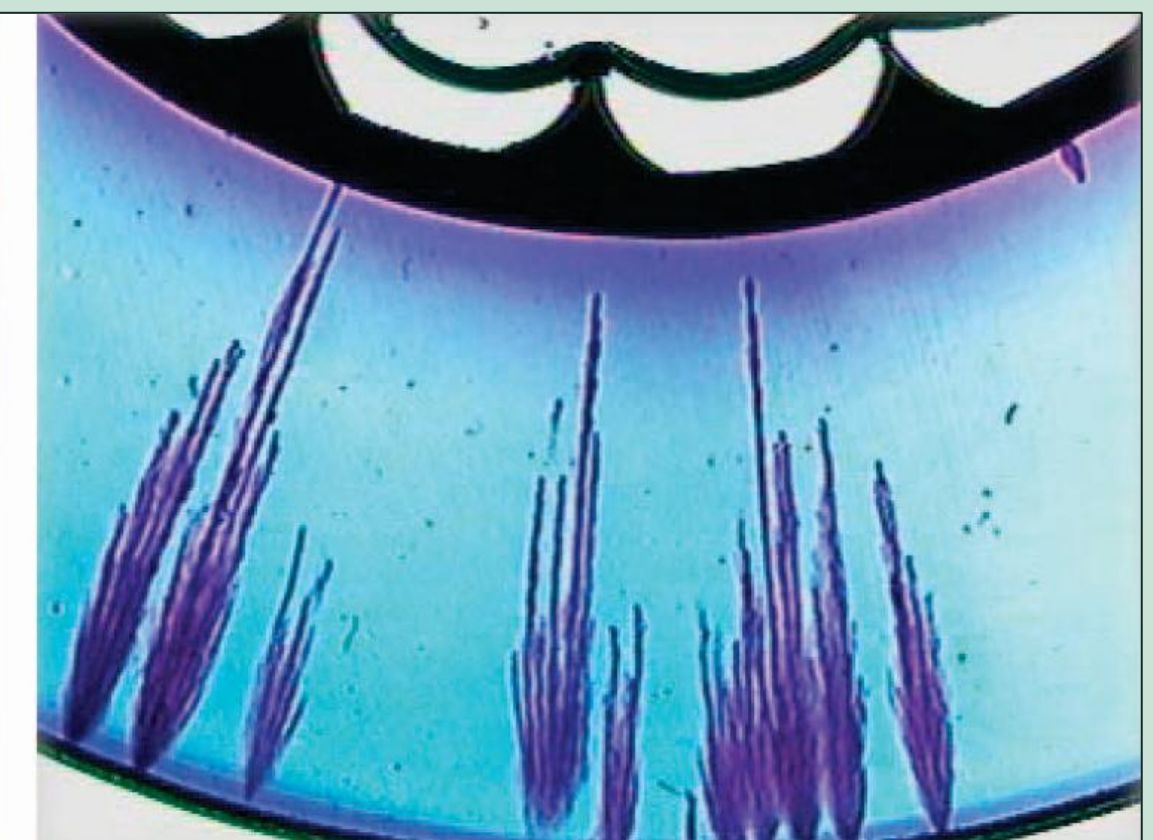
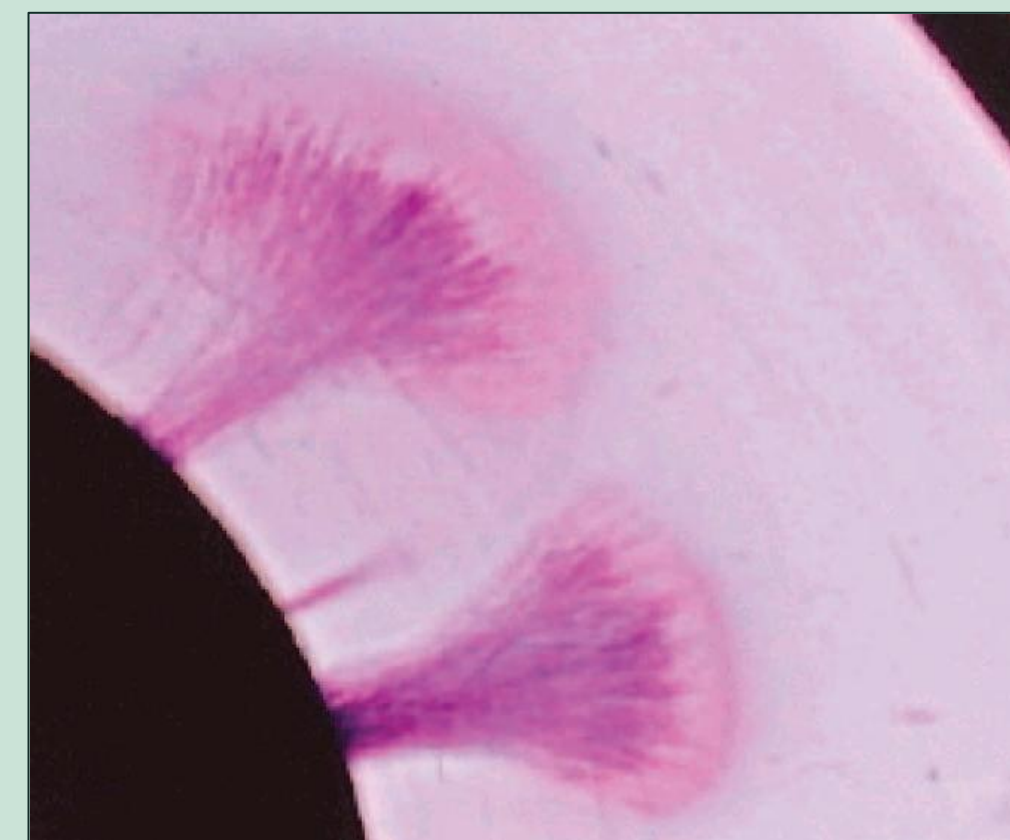
Istnieje wiele przyczyn inicjacji drzewienia wodnego związanych z niedoskonałościami układu izolacyjnego:

- **mechaniczne uszkodzenie izolacji** (rysa lub zadrapanie)
- **nieprecyzyjne wykonanie ekranu półprzewodzącego**
- **brak centryczności** poszczególnych warstw izolacji wynikających z nieregularności interfejsów

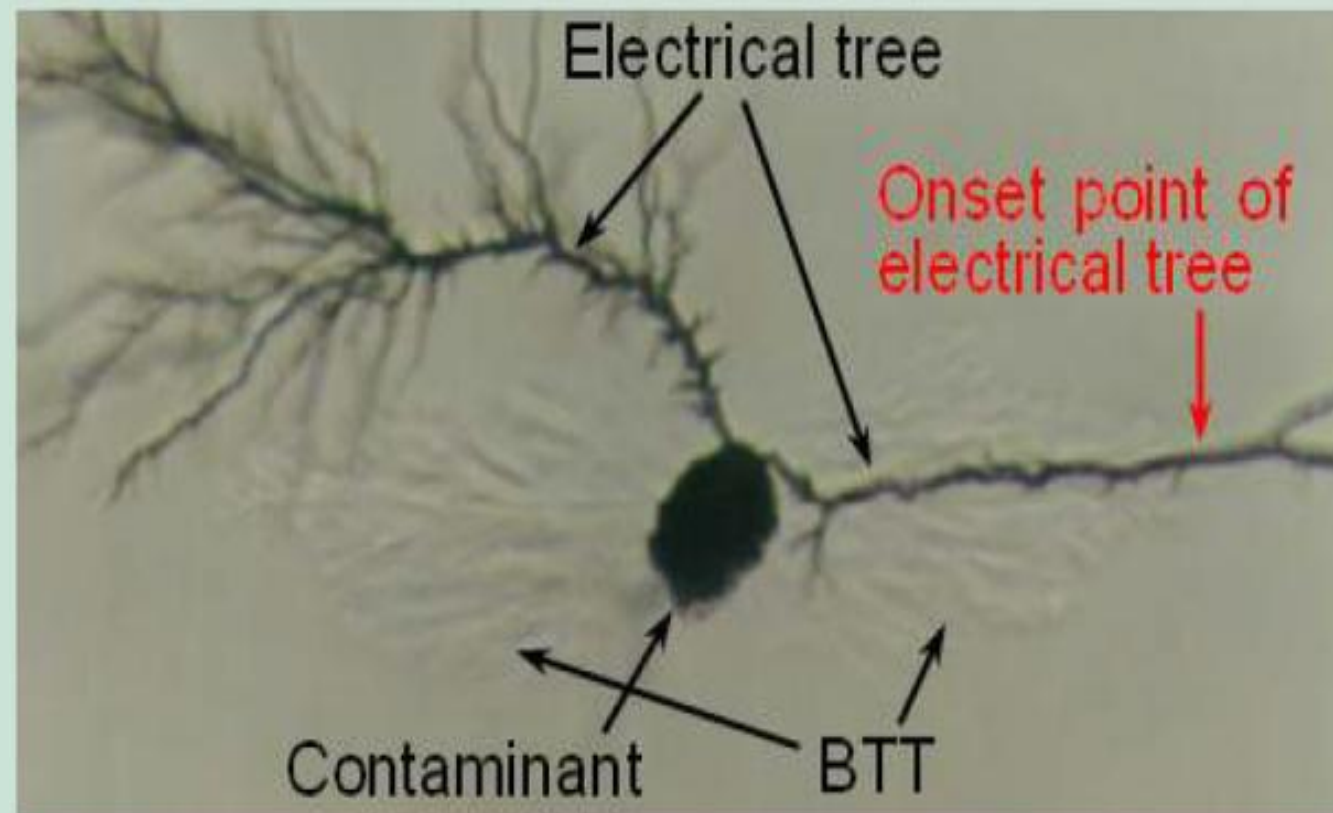


Kluczowe są gładkie powierzchnie styku ekranów półprzewodzących z izolacją. **Jakiegokolwiek nieciągłości w tym obszarze stanowią czynnik sprzyjający inicjacji drzewienia.**

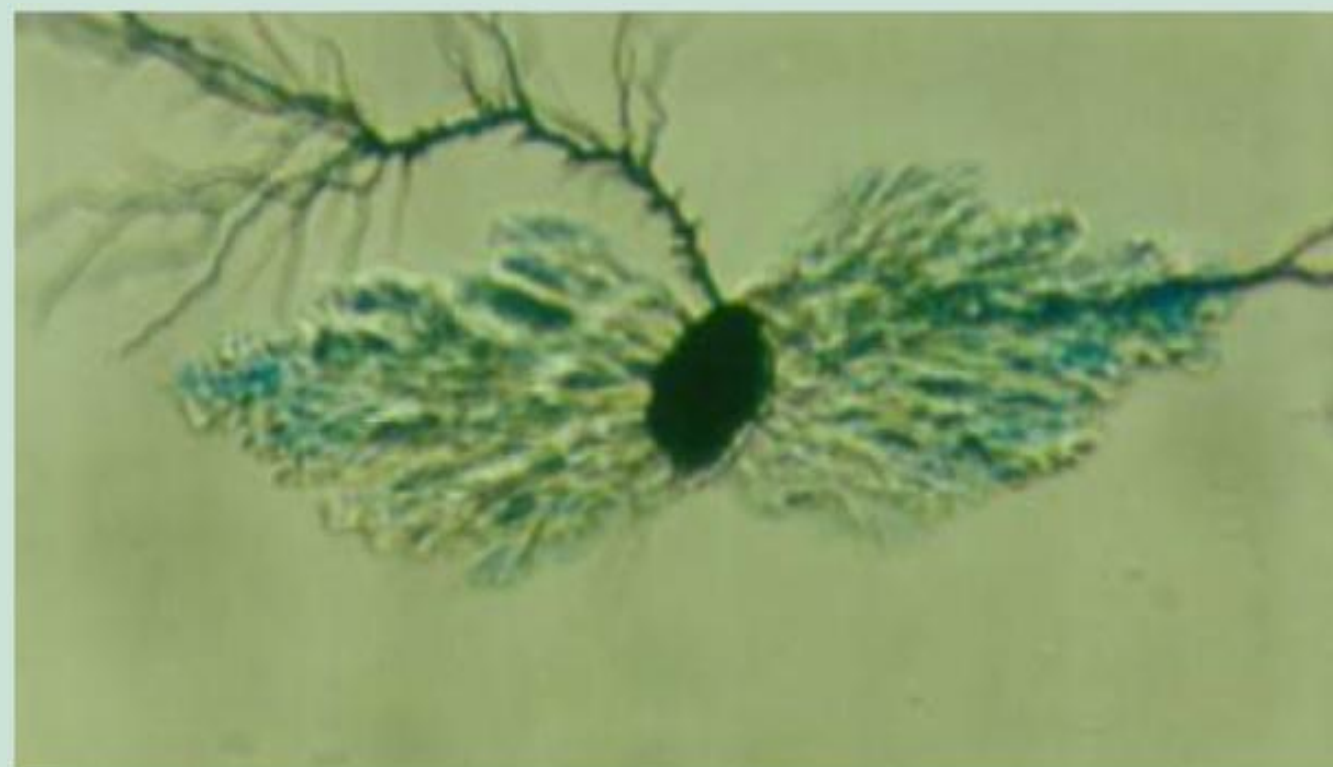
Newralgicznymi miejscami są również lokalne wzmocnienia pola elektrycznego wynikające z **ostrymi, nieregularnymi krawędziami na styku ekran-izolacja.**



Innym rodzajem efektu drzewienia wodnego są **drzewka typu bow-tie** → inicjowane obecnością zanieczyszczeń w izolacji, które w większości mają charakter polarny umożliwiając wnikanie wilgoci w **amorficzne obszary XLPE**.



before dying

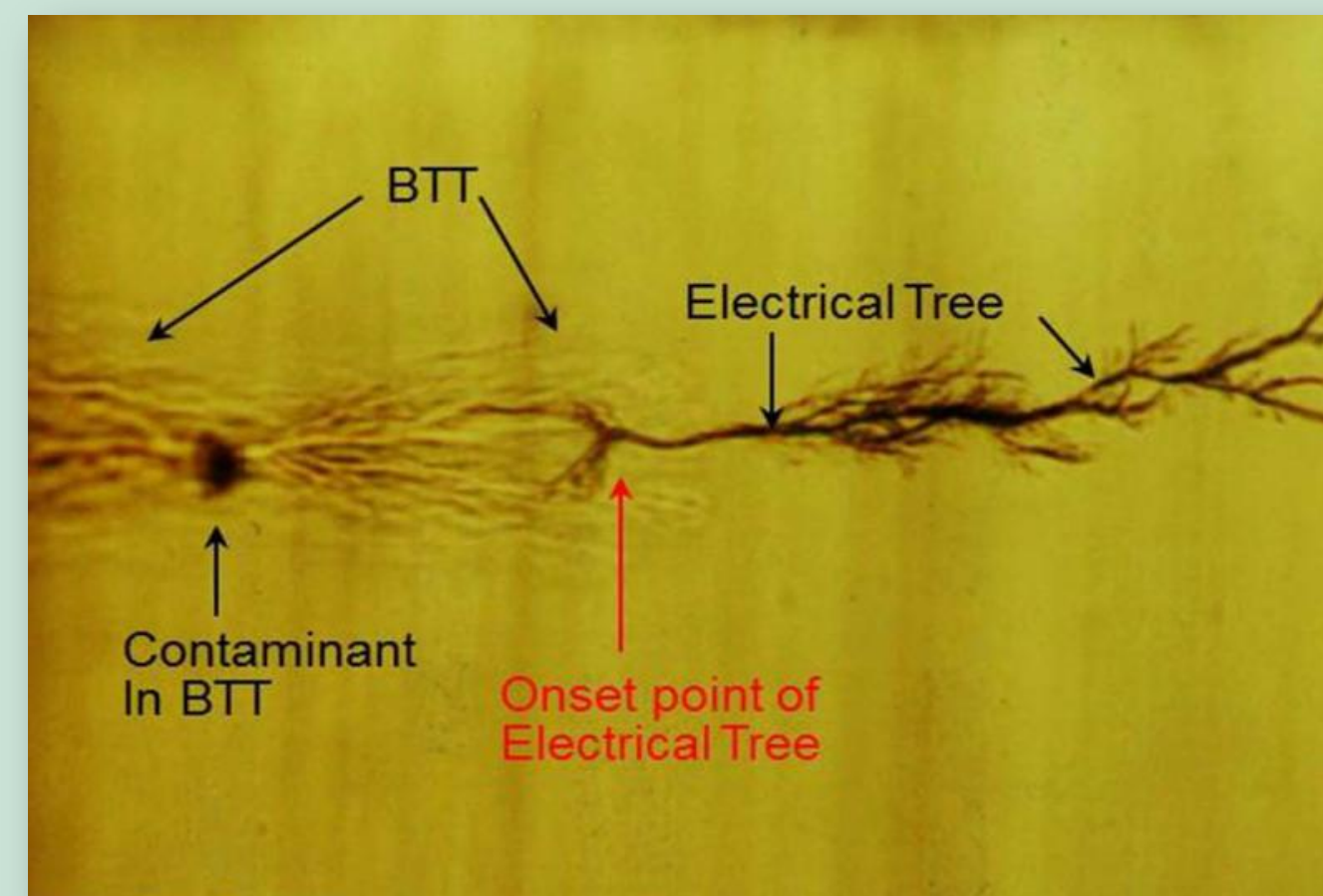
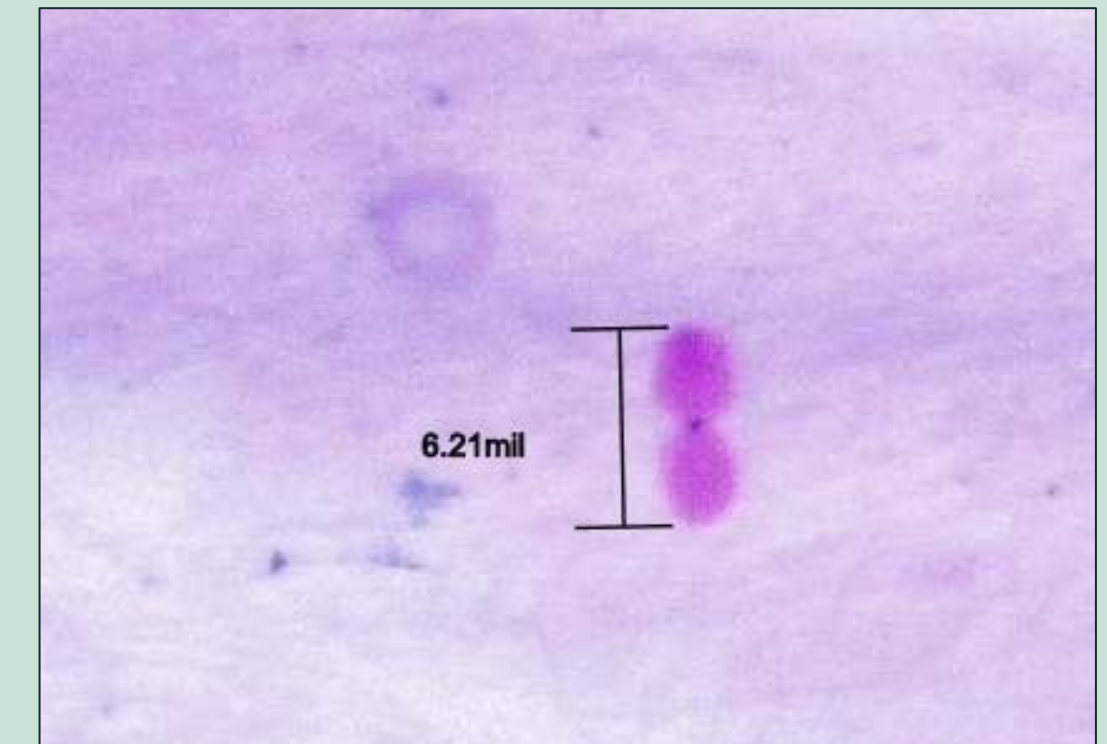


after dying

50 μm

Polarne obszary izolacji mogą powstawać poprzez:

- zanieczyszczenia powstałe podczas wytwarzania granulatu
- podczas wytłaczanie tworzywa
- niewystarczającą homogenizację
- niedostateczną ilość antyutleniaczy lub stabilizatorów
- podczas mechanicznych zarysowań, uszkodzeń izolacji



Punkt początkowy inicjacji drzewka elektrycznego znajduje się na końcu struktury bow-tie.

Zjawisko to można wytłumaczyć jakościowo, przyjmując, że bow-tie jest strukturą wykazującą wysoką przenikalność elektryczną w strukturze XLPE.

Drzewka typu bow-tie składają się z **licznych mikroporów** → przenikalność elektryczna obszarów bow-tie jest uznawana za wyższą niż przenikalność XLPE.

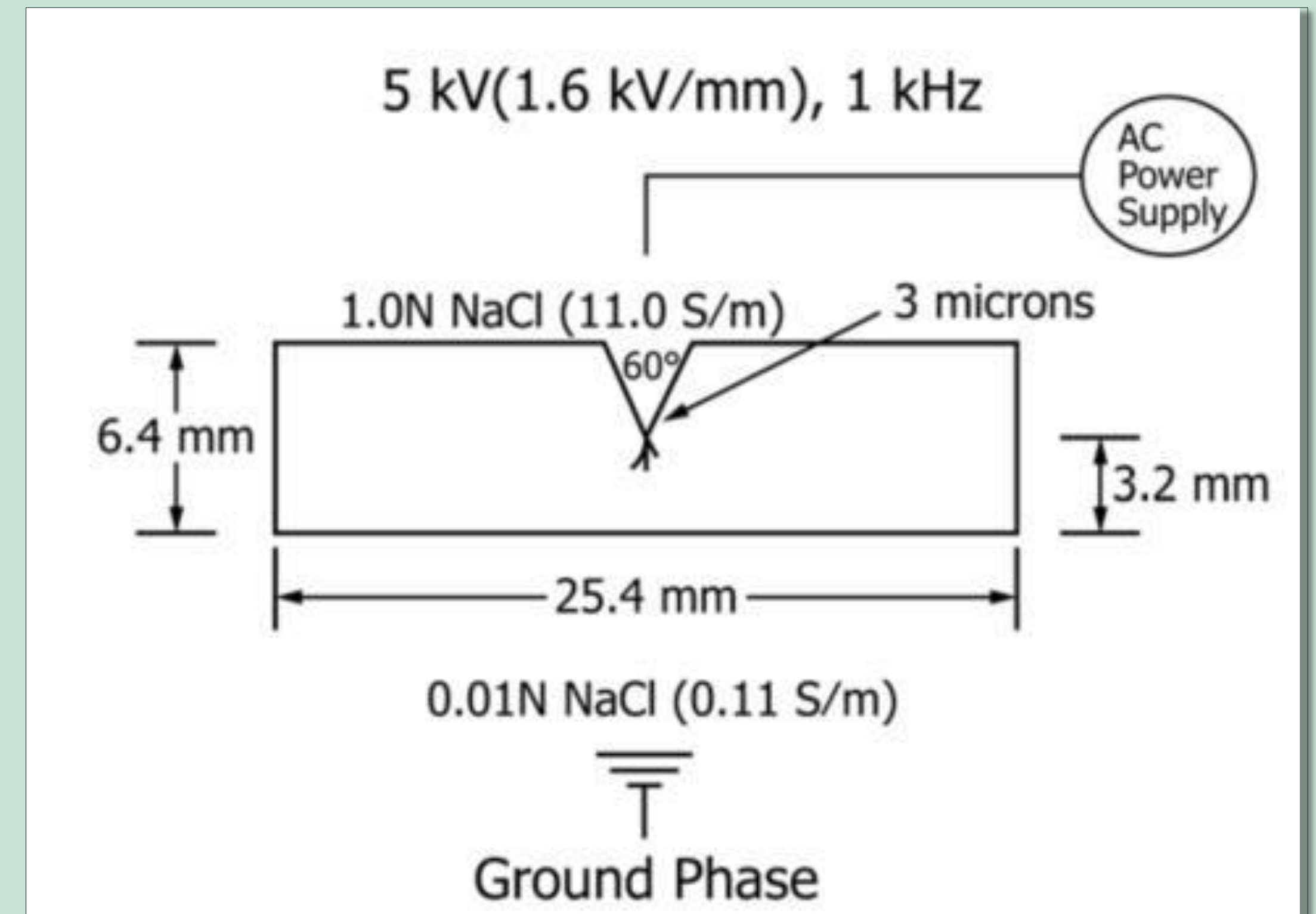
Opracowanie nowego materiału izolacyjnego WTR rozpoczyna się w laboratorium, gdzie sprawdza się jego odporność na degradację pod wpływem wilgoci, właściwości mechaniczne oraz stabilność dielektryczną.

Zastosowanie specjalnych dodatków stabilizujących oraz precyzyjne kontrolowanie procesu sieciowania PE jest kluczowe do minimalizacji wzrostu drzewek.

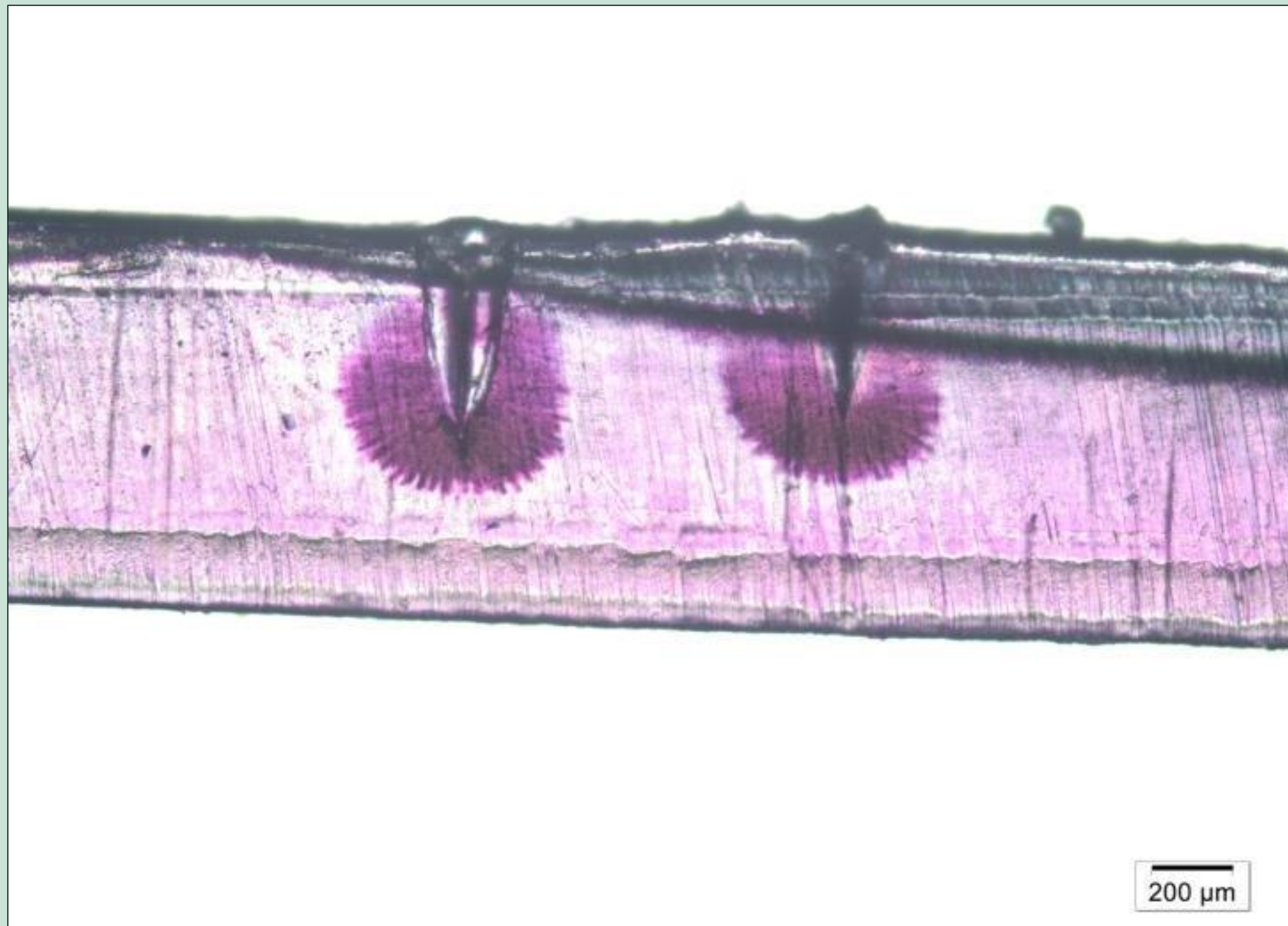


Wg ASTM D6097 do badań wykorzystuje się elektrolit w postaci solanki (NaCl). Proces badawczy obejmuje kilka kluczowych etapów:

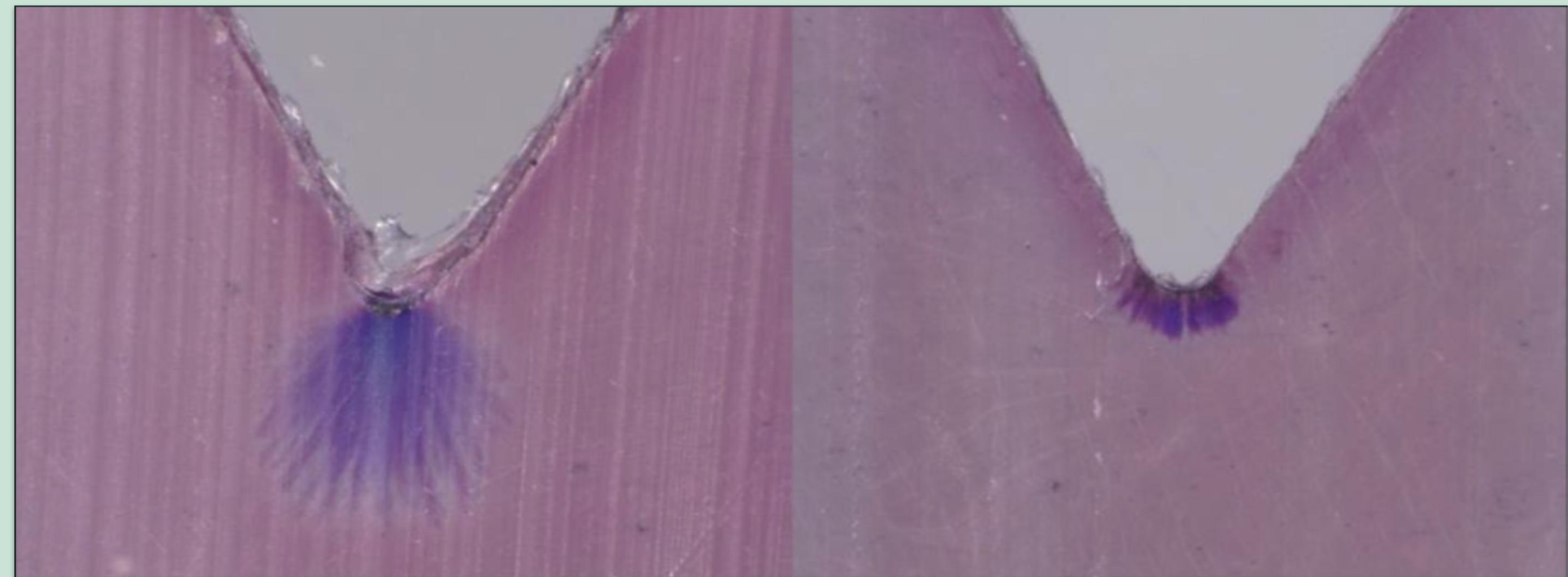
- przygotowanie próbek i kondycjonowanie w środowisku wodnym – **nasycanie izolacji**
- **ekspozycja próbek** na działanie pola elektrycznego i wody
- **wytrzymałość dielektryczna** – pomiar napięcia przebicia
- szczegółowa **analiza mikroskopowa**



Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają na **lepsze zrozumienie mechanizmów degradacji materiału WTR** oraz **ocenę jego zachowania w warunkach długoterminowej eksploatacji bez konieczności produkcji odcinka prototypowego kabla w pierwszych fazach projektu.**



Dzięki uzyskanym danym możliwa jest optymalizacja receptury, **zwiększając jej odporność na degradację wodną, eliminując negatywny wpływ czynników środowiskowych**, a także optymalizacja procesów produkcyjnych i sieciowania polietylenu.



Broszura **CIGRE TB 722** wyraźnie zaleca przeprowadzenie **dodatkowych testów dla kabli podmorskich** o napięciach od 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) do 60 kV ($U_m = 72,5$ kV), które stanowią kwalifikację kabli typu „wet” i „semi-wet”
→ **możliwość pracy dielektryka w wodzie morskiej.**

CIGRE TB 722 przewiduje 3 alternatywne protokoły starzeniowe, w których medium nasycające stanowi solankę:

- Reżim A
- Reżim B
- Reżim C

Najczęściej stosowane testy starzeniowe w warunkach wilgotnych obejmują częstotliwości 50 Hz lub 60 Hz i czas trwania do 2 lat.

Próbki muszą przejść proces wstępnego kondycjonowania

Próbki zanurza się w solance o zasoleniu 3-6%, temperaturze $55 \pm 5^\circ\text{C}$ i ciśnieniu 900-1500 mBar bez przyłożonego napięcia przez:

- próbki o grubości izolacji $\leq 8,8$ mm min 500h
- próbki $> 8,8$ mm wg. wzoru $(100 + 46 \times \text{grubość izolacji})\text{h}$ lub testu za pomocą **metody miareczkowania Karla-Fischera**.



Table 3.4 Test Conditions of test object regime A and B.

	Regime A	Regime B
Saturating Medium External to the Insulation Screen	Sea Water Substitute (see Table 3.2 Pre-Conditioning Protocol)	
Salinity of Water	3 % < total ionic content w/w < 6 %	
Water Surface Area	≥ 0.5 m ² per cubic meter of tank	
Applied Frequency	49 Hz → 61 Hz	500 Hz \pm 10 Hz
Duration #1*	$\geq 8,750$ hrs.	$\geq 3,000$ hrs.
Insulation Screen Temperature #1	Water Temperature Set at $40^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$	
Applied Electric Field #1	If $E_{\text{design}} \leq 5.5$ kV/mm then $E_i \geq 9$ kV/mm -10 % If $E_{\text{design}} > 5.5$ kV/mm then $E_i \geq (E_{\text{design}} * 9/5.5)$ kV/mm -10 %	
Duration #2*	$\geq 17,500$ hrs .	No Requirement
Insulation Screen Temperature #2	As #1	
Applied Electric Field at Conductor (E_i) #2	As #1	

* Testing for Duration #1 & #2 can be carried out in parallel and on separate samples.

Celem długotrwałego badania starzeniowego jest odwzorowanie warunków, w jakich materiał izolacyjny będzie eksploatowany. Przeprowadza się długoterminowe testy laboratoryjne, a następnie oceniana jest wytrzymałość na przebicie.

Próbki testowe, aby były reprezentatywne dla produktu produkcyjnego, ich metoda produkcji oraz użyty sprzęt powinny być **jak najbardziej zbliżone do tych, które będą stosowane w produkcji kabli.**



	Obiekt testowy	Zakres stosowalności
Materiał żyły roboczej	Miedź	Tylko miedź
	Aluminium	Miedź i aluminium
Konstrukcja żyły roboczej	Solid* lub wielodrutowa	Solid i wielodrutowa
Rozmiar żyły roboczej	$\geq 50 \text{ mm}^2$	$10 \text{ mm}^2 \rightarrow 1600 \text{ mm}^2$
Ekran żyły roboczej	Wymagany, koekstrudowany i jednoznacznie określony	Tylko dla testowanego materiału
Materiał izolacyjny		
Grubość materiału izolacyjnego	$\geq 4,5 \text{ mm}$	$2.5 \text{ mm} \rightarrow 15 \text{ mm}^{**}$
Ekran izolacji	Wymagany, koekstrudowany i jednoznacznie określony	Tylko dla testowanego materiału
Promieniowe uszczelnienie	Usunięte	Wszystkie konstrukcje z uszczelnieniami (włączając brak)

* nie dotyczy reżimu C

** wymagania dotyczące natężenia pola elektrycznego ograniczą tę wartość

Celem precyzyjnego określenia stopnia degradacji materiału stosuje się próbę napięciową polegającą na stopniowym zwiększaniu napięcia o częstotliwości sieciowej na pojedynczej próbce, aż do jej przebicia.

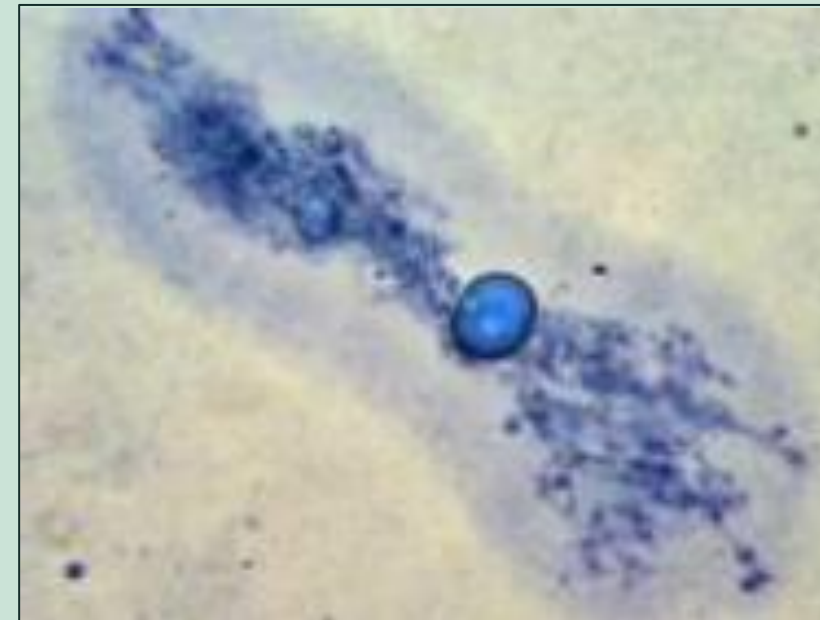
Badanie wytrzymałości dielektrycznej jest kluczowym elementem oceny niezawodności kabli podmorskich.

Zapewnienie odporności dielektryka na degradację pozwala na optymalizację systemów przesyłowych oraz długoterminową efektywność eksploatacyjną w wymagających warunkach morskich.



Przewaga PP:

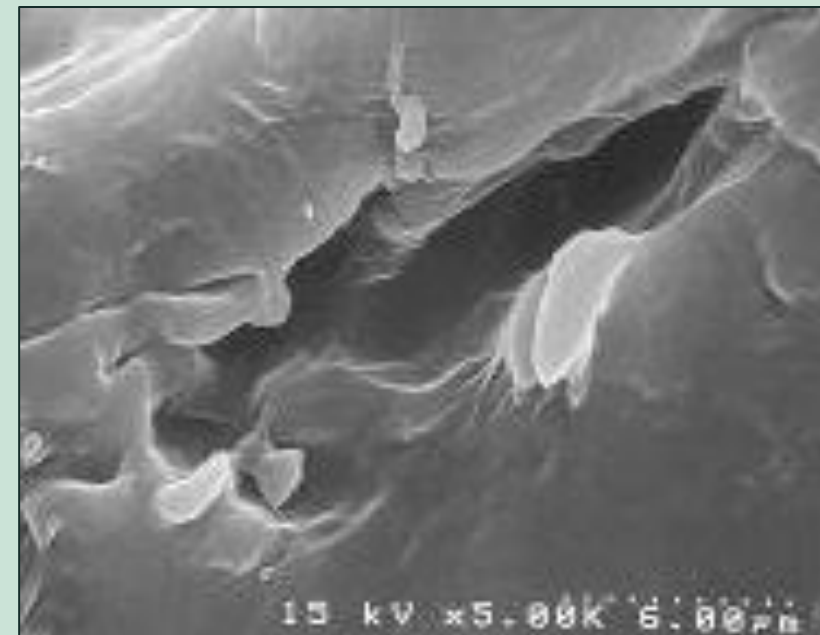
- ✓ wysoka temperatura topnienia (167°C)
- ✓ doskonała odporność mechaniczna wśród termoplastów
- ✓ Ciągły proces produkcyjny eliminujący sieciowanie chemiczne
- ✓ Wyższe temperatury eksploatacyjne (110°C w normalnym trybie, 130°C w awaryjnym) zachowując tę samą temperaturę zwarcia



drzewka wodne

Większy poziom filtracji materiału

Doskonałe zachowanie w testach starzenia w wodzie dzięki niskiemu poziomowi zanieczyszczeń.



mikro-ubytki

Brak reakcji chemicznej

Lepsza morfologia, poprawiona wydajność w badaniach długotrwałych.



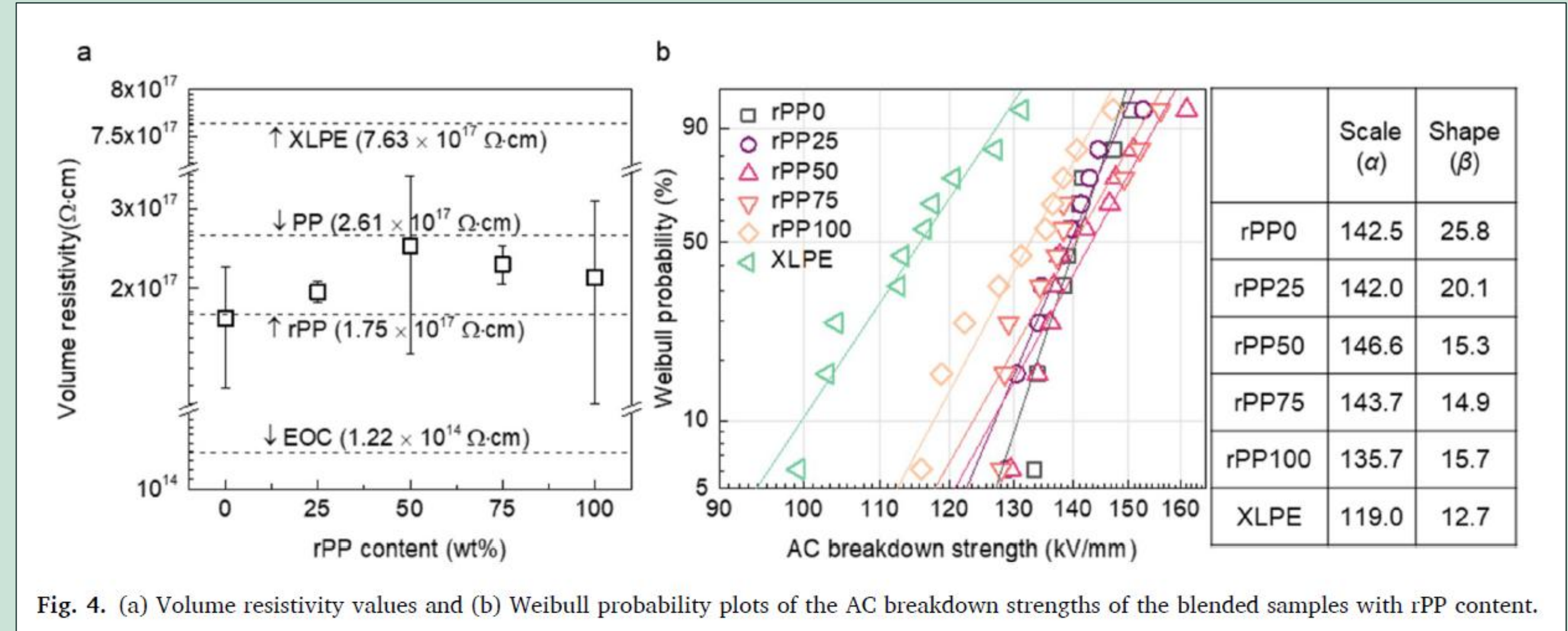
podsieciowania

Brak ryzyka podsieciowania

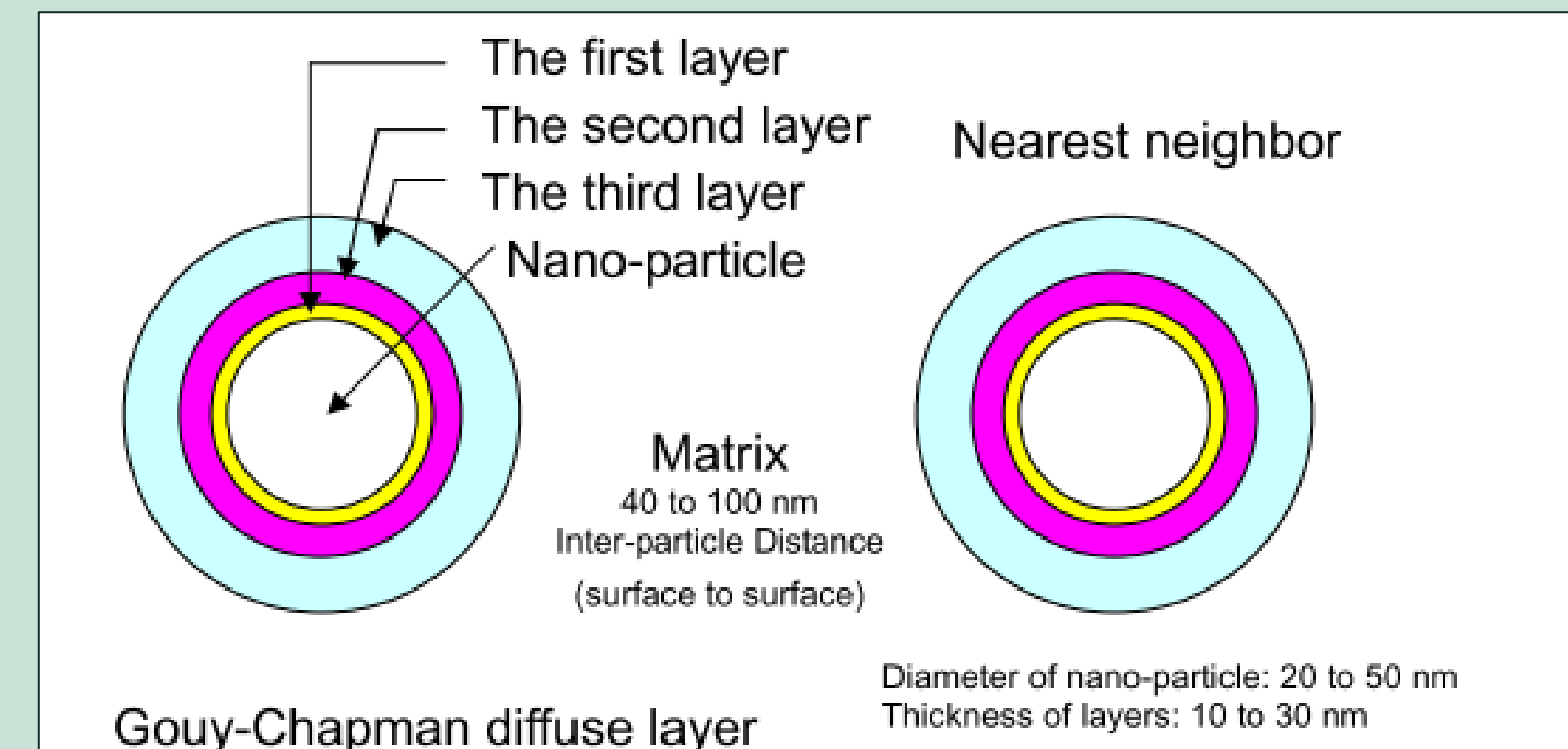
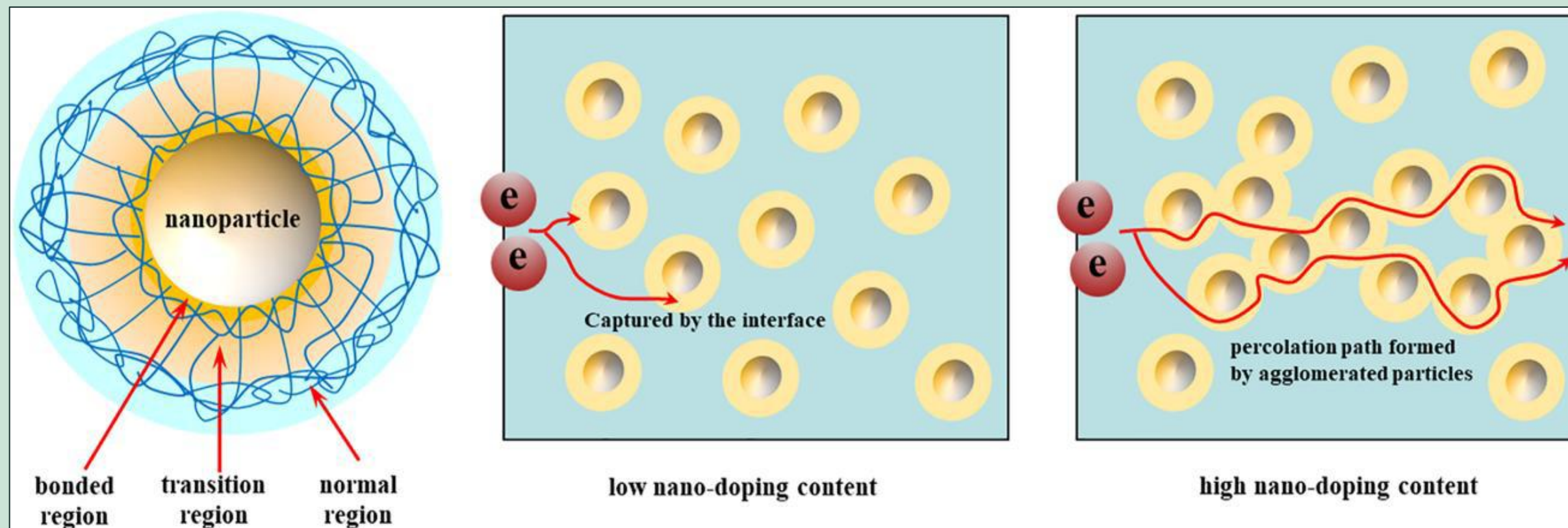
Całkowity brak podsieciowań prowadzi do bardziej niezawodnej izolacji kabla

Rozwój nanokompozytów znacząco poszerzył możliwości zastosowania PP w izolacjach kablowych → **poprawa właściwości mechanicznych oraz stabilności w warunkach eksploatacyjnych.**

W celu poprawy właściwości PP prowadzone są badania nad wprowadzeniem nanonapełniaczy tj. **nanoglinka, tlenki metali czy nanocząsteczki o wysokiej przenikalności**, a ich wyniki wskazują na znaczną poprawę kluczowych parametrów materiału.



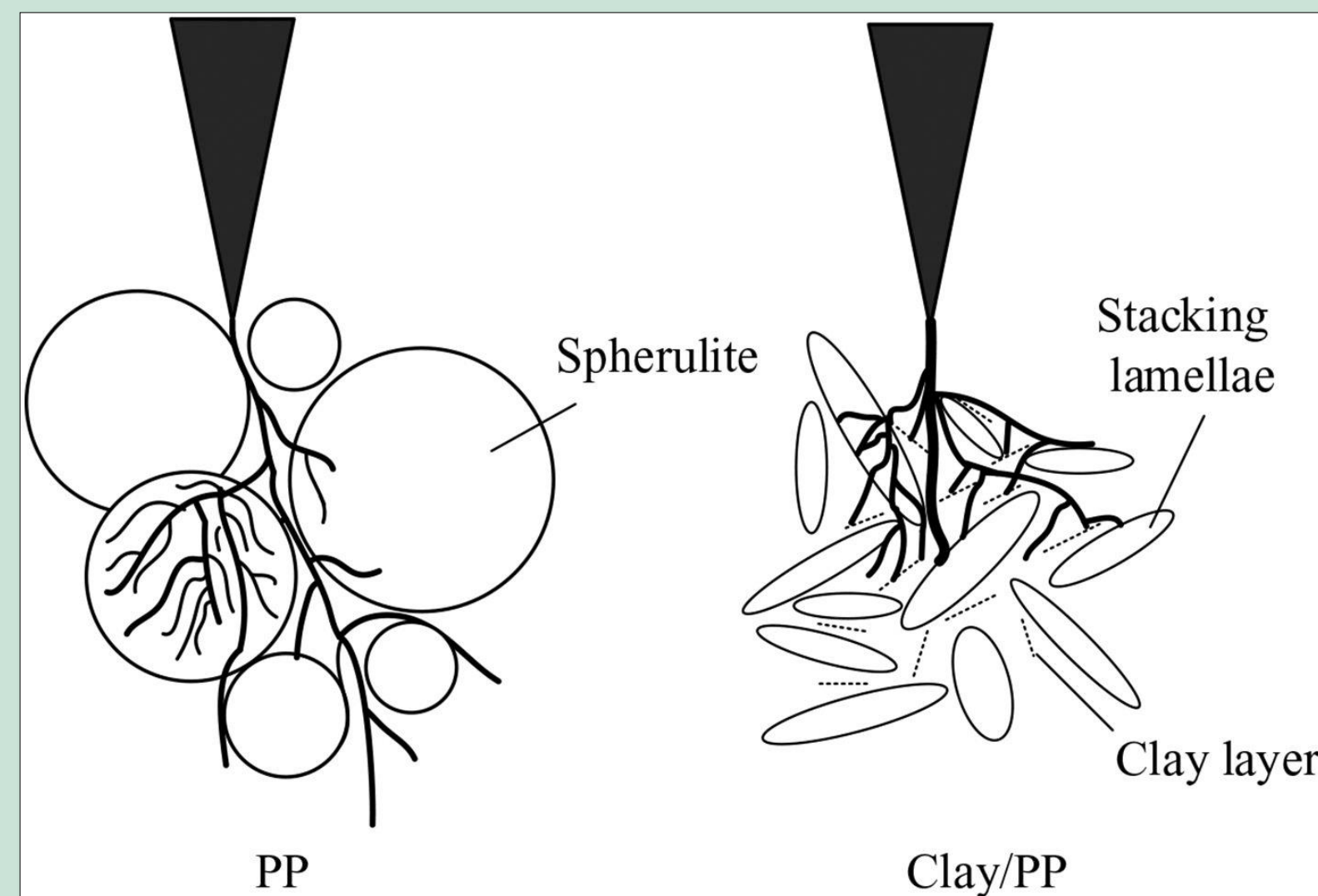
Poprawa właściwości nanokompozytów wynika z **rozległego interfejsu** pomiędzy matrycą polimerową, a nanonapełniaczami. Przykładem opisu wpływu tej interakcji jest model wielordzeniowy, wprowadzający koncepcję równomiernie rozmieszczonych nanocząstek o średnicy kilkudziesięciu nanometrów.



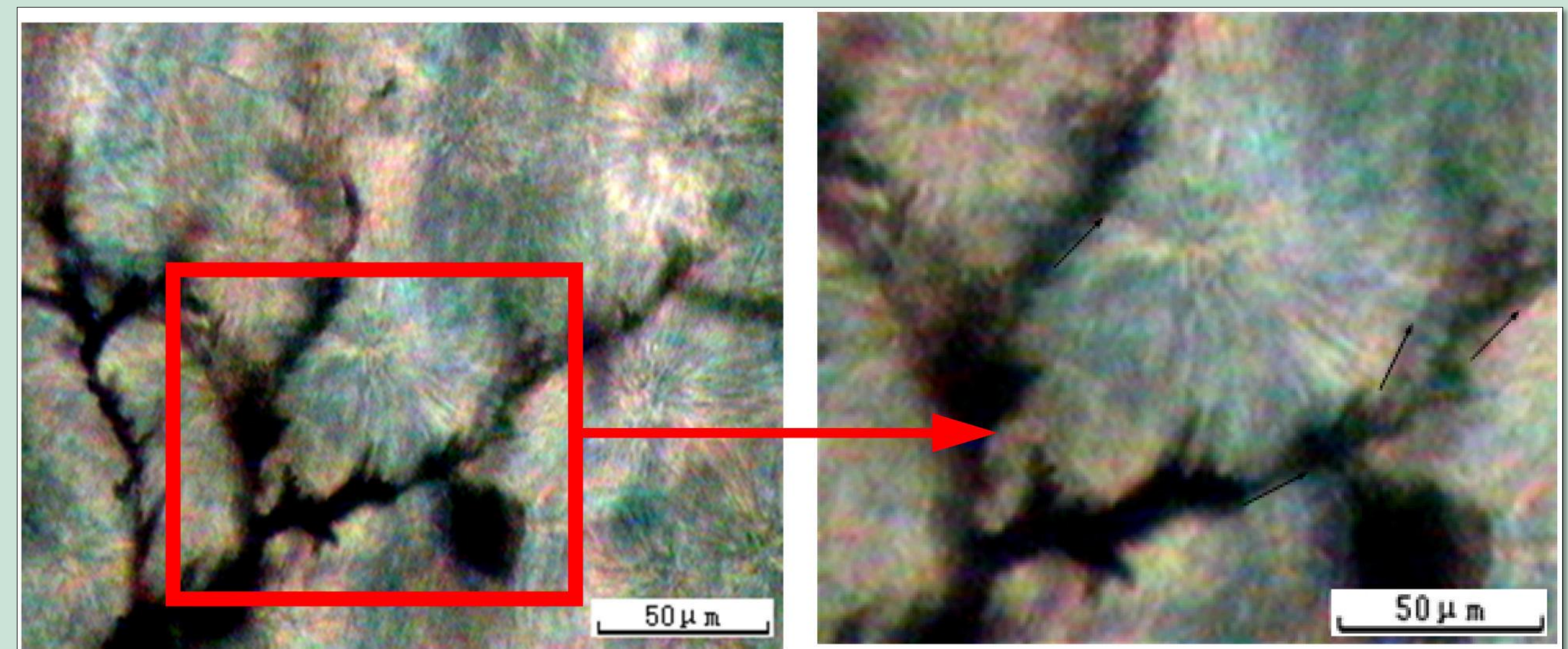
PP to półkryształiczny polimer o złożonej heterogenicznej strukturze → **rozkład interfejsu fazy krystalicznej i amorficznej.**

Wpływ nanonapełniaczy (na przykładzie MMT) na propagację drzewienia:

- ✓ **Efekt heterogenicznego zarodkowania** – MMT działa jako centrum zarodkowania krystalicznego, co prowadzi do wzrostu krystaliczności, zmniejszenia krystalitów oraz zwiększenia powierzchni interfejsu → wzrost rozgałęzień drzewek elektrycznych, poprawa właściwości mechanicznych i elektrycznych
- ✓ **Funkcja bariery warstw nieorganicznych** – warstwy nanonapełniaczy tworzą fizyczną barierę dla rozwoju kanałów



Wpływ MMT na wzrost rozgałęzień drzewek elektrycznych



Rozwój drzewienia wzdłuż interfejsu fazy krystalicznej i amorficznej w PP

Stosowanie środków sieciujących prowadzi do powstawania niepożądanych produktów ubocznych, których obecność w izolacjach kabli XLPE może powodować akumulację ładunków przestrzennych w polu elektrycznym DC → zniekształcenie lokalnego pola elektrycznego w materiale izolacyjnym, co może skutkować degradacją elektryczną i ostatecznie awarią izolacji.

Tenarne mieszaniny (rPP25, rPP50, rPP75):

- ✓ Znacząca redukcja akumulacji ładunku (struktura nanokompozytu)
- ✓ Zwiększona mobilność ładunku dzięki kompatybilnemu interfejsowi

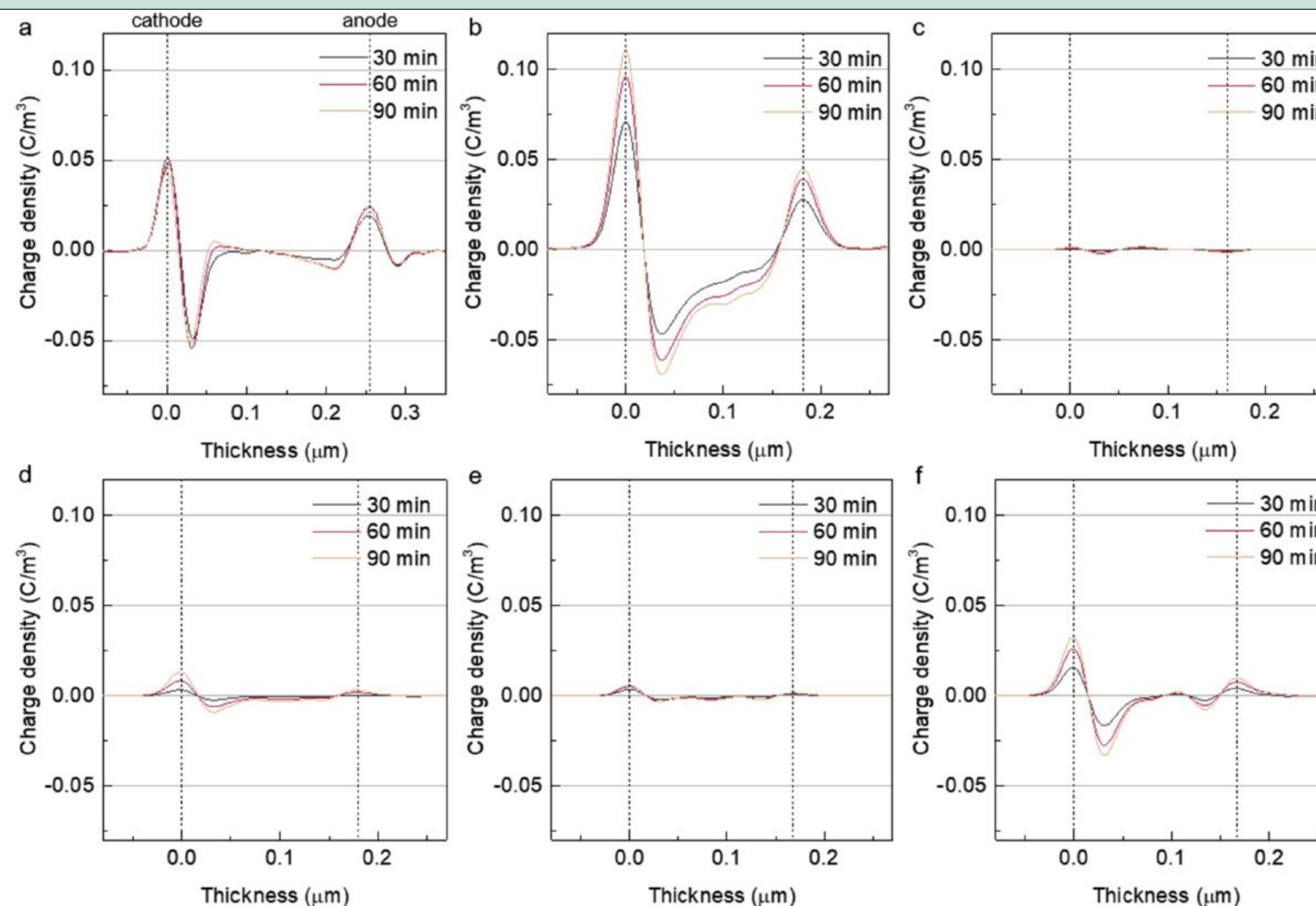


Fig. 5. Space charge distributions of (a) XLPE, (b) rPP0, (c) rPP25, (d) rPP50, (e) rPP75, and (f) rPP100 during depolarization, respectively. The thickness values of the each samples were 264, 178, 174, 168, 156, and 156 μm for the XLPE, rPP0, rPP25, rPP50, rPP75, and rPP100 samples, respectively.

Zaprojektowanie błędny PP zawierającej zdyspergowane nanonapełniacze ogranicza nagromadzenie ładunków, co poprawia właściwości elektroizolacyjne materiału.

Dziękuję Państwu za uwagę!



Iga Korczyńska

Kierownik Zespołu Technologicznego ds. kabli MV i JDR iga.korczynska@tfkable.com

Tele-Fonika Kable SA – Bydgoszcz Plant
