

**Kierunki rozwoju kabli SN i WN pod
względem innowacyjnych materiałów
izolacyjnych.**

**Zjawiska i wyzwania przy projektowaniu
kabli DC oraz rozwoju izolacji PP.**

V Konferencja "Linie i stacje elektroenergetyczne"

Leszek Resner

Dyrektor ds. Technologii i Rozwoju -
Główny Technolog Zakładu Bydgoszcz

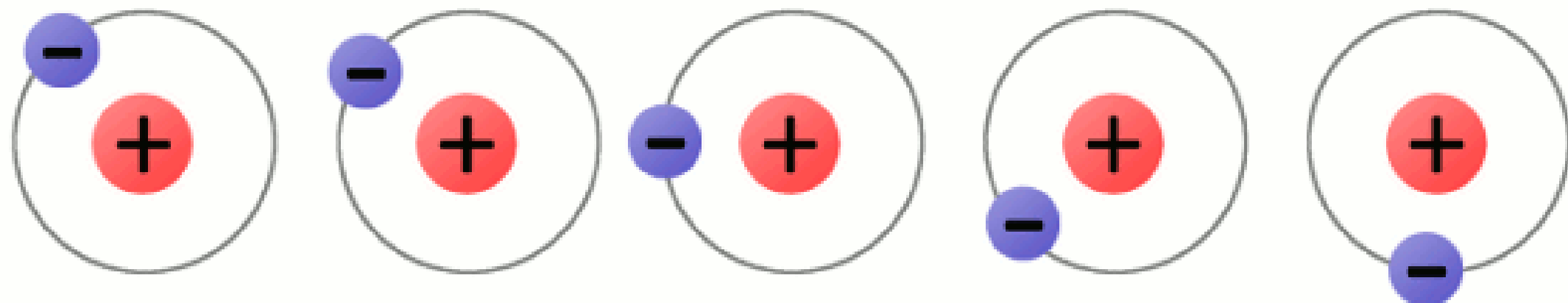
Brighter Future
in Energy

TF
Group



- **Wstęp - rola inżynierii materiałowej w projektowaniu kabli elektroenergetycznych ŚN i WN**
- **Obecnie stosowane materiały izolacyjne w kablach ŚN i WN**
- **Trendy i kierunki rozwoju materiałów stosowanych w tych kablach**
 - **Wyzwania związana z zastąpieniem izolacji XLPE przez tworzywa termoplastyczne np. PP**
 - **Materiały izolacyjne stosowane w kablach DC oraz zjawiska, które należy uwzględnić w trakcie projektowania takich kabli**

Przewodniki



Zjawiska:

Np. rezystywność

$10^{-8} \Omega \cdot m$

$$\vec{E} = \rho \vec{j},$$

gdzie:

\vec{j} – gęstość prądu elektrycznego,

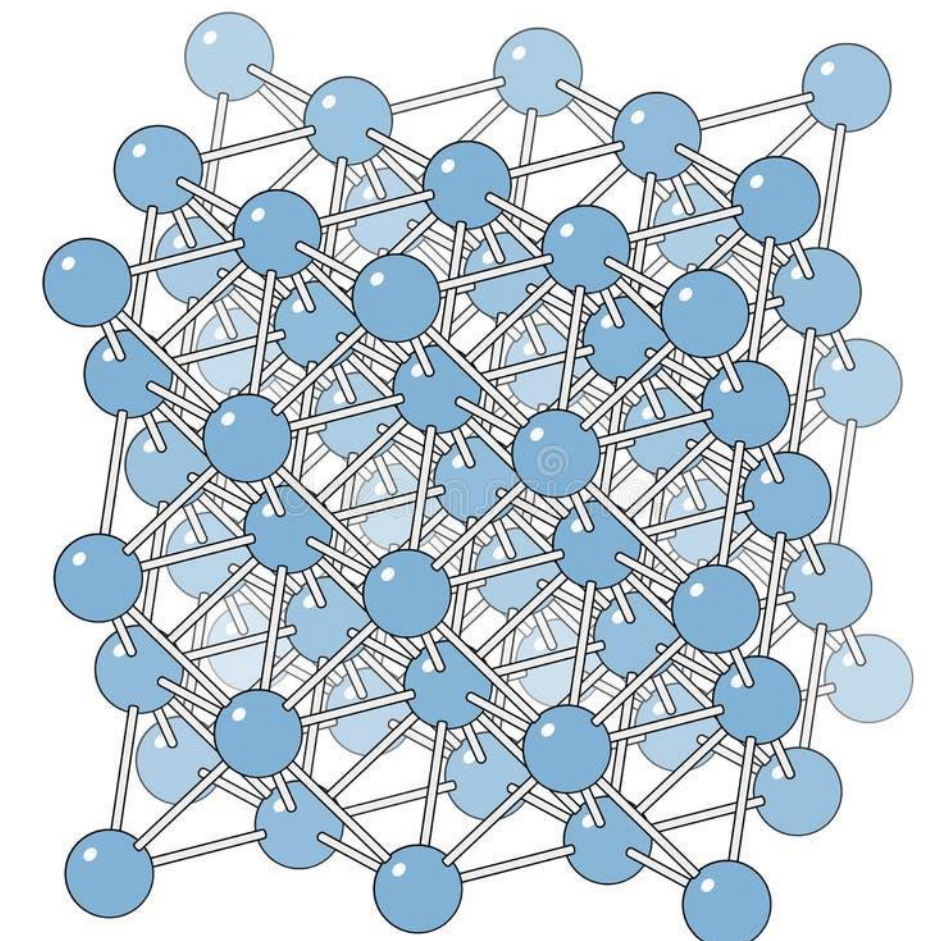
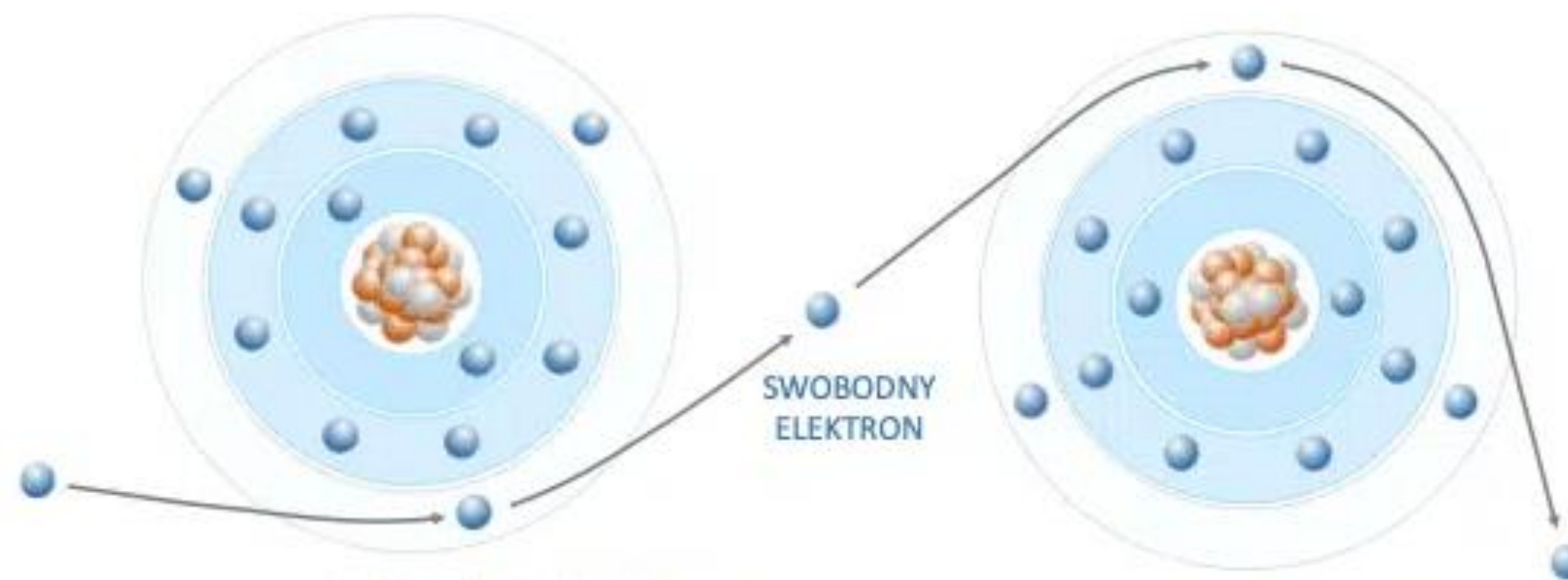
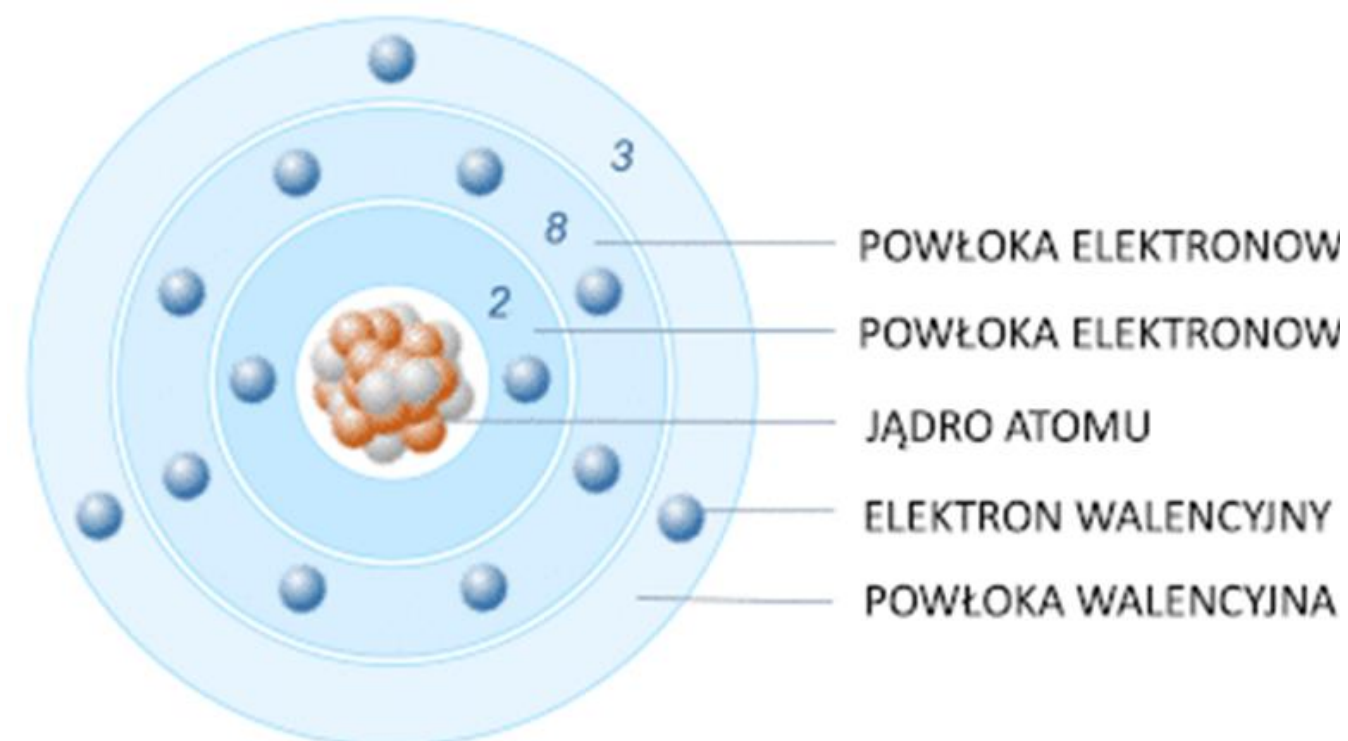
\vec{E} – natężenie pola elektrycznego.

Np. wpływ temperatury:

Wzrost amplitudy drgań atomów w sieci krystalicznej = większe rozproszenie nośników (chmura elektronowa)



Np. Aluminium



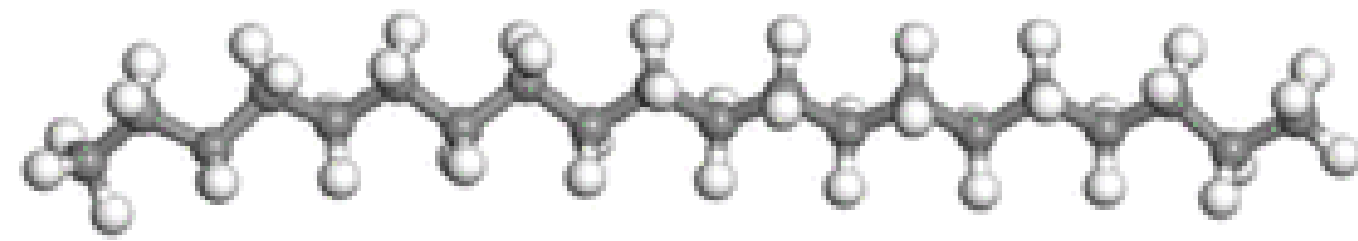
[1]

Izolatory

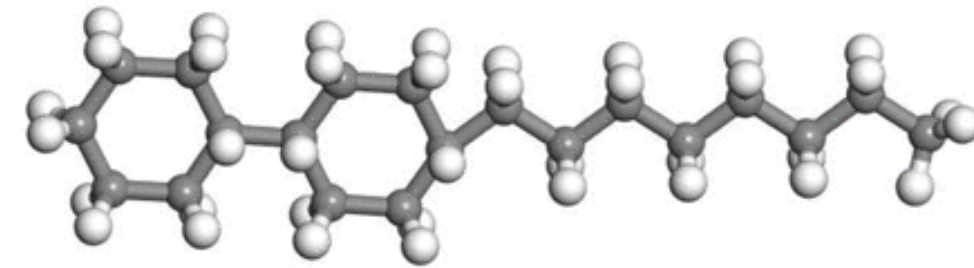
$> 10^{10} \Omega \cdot m$



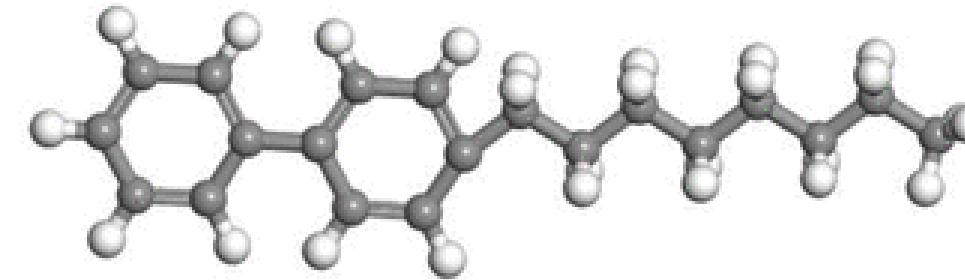
Olej



a) $C_{20}H_{42}$ alkany (ponad 50%)

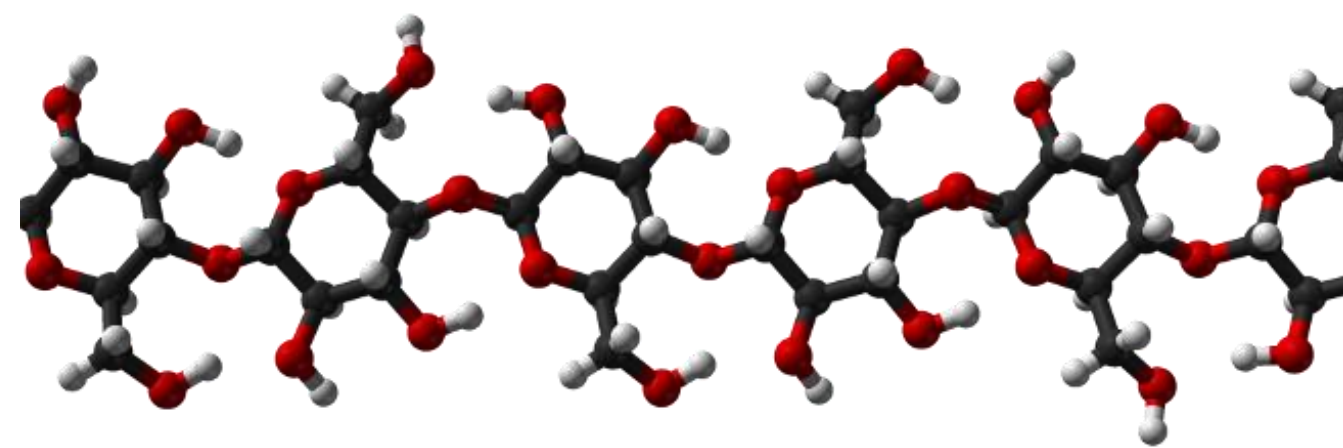


b) $C_{20}H_{38}$ cykloalkany (10-40%)



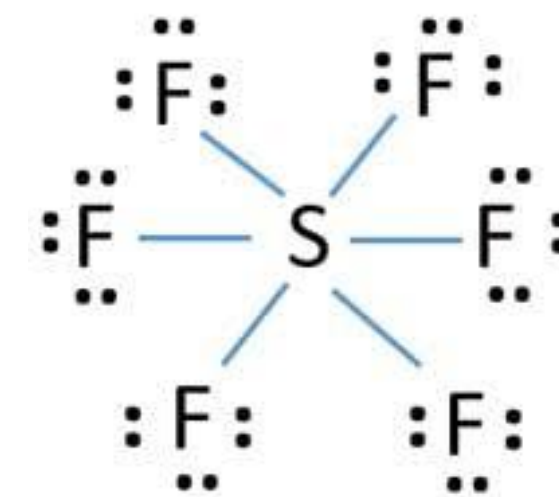
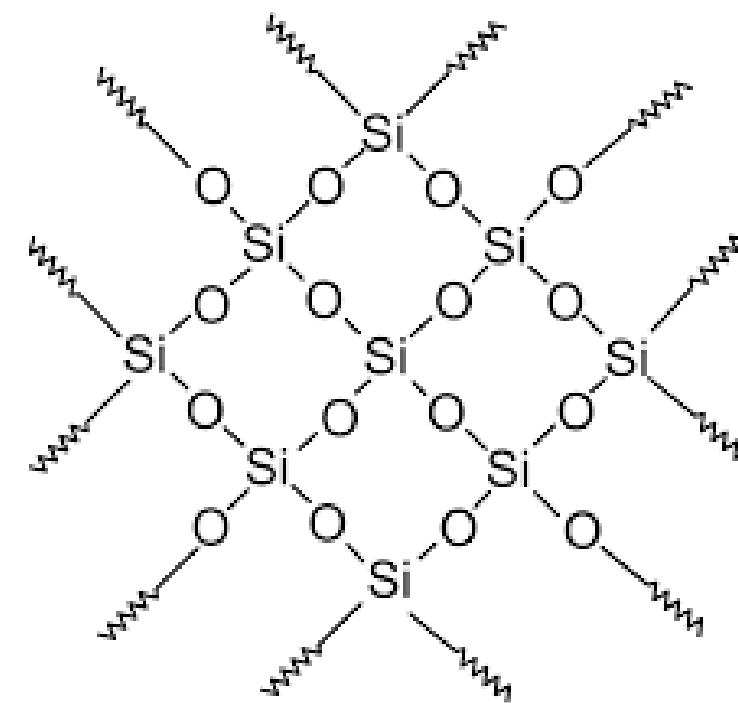
b) $C_{20}H_{26}$ węglowodory aromatyczne (5-15%)

Celuloza



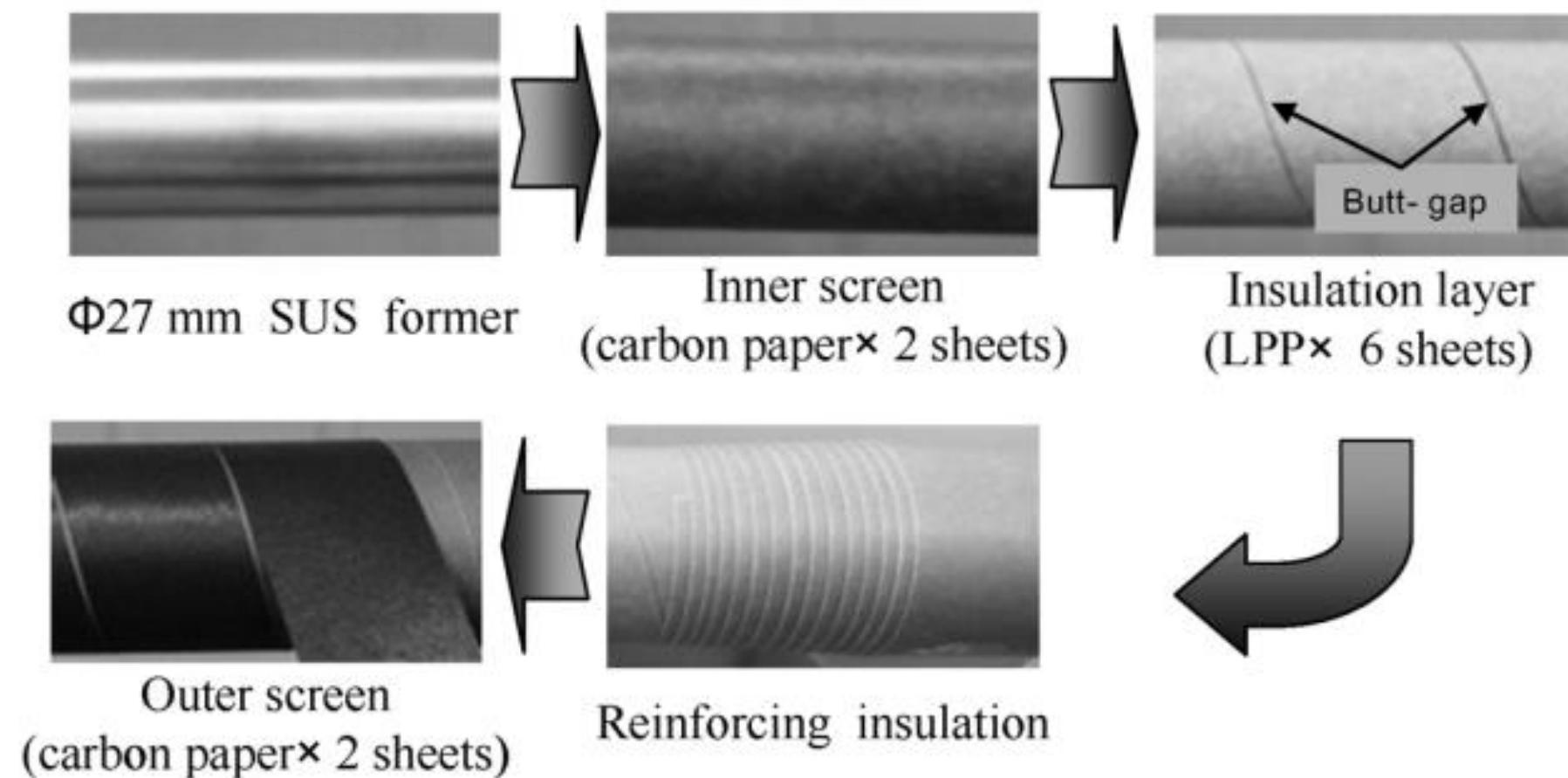
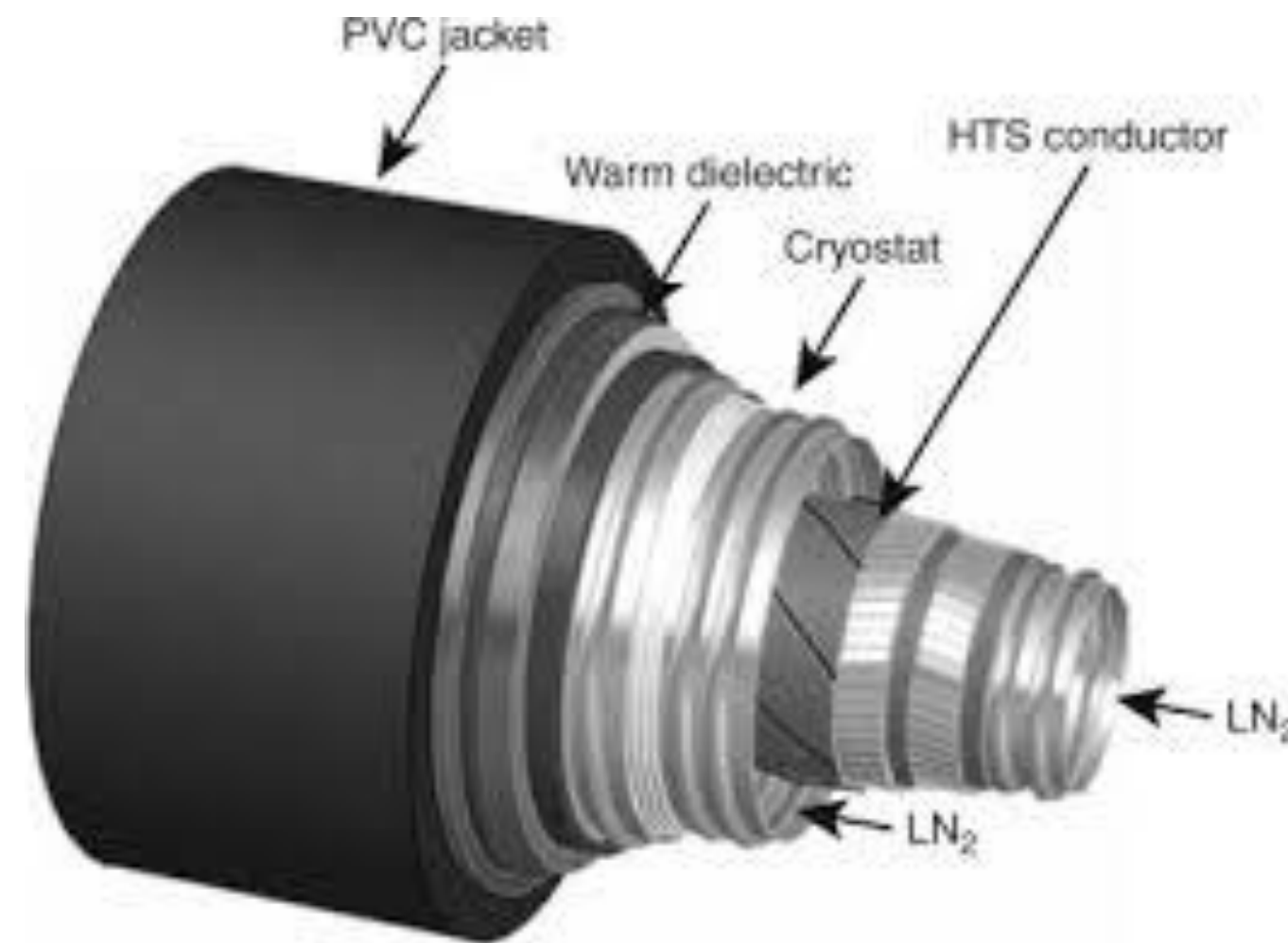
Ceramika (porcelana krzemionkowa, wysokoglinowa ...)

Gaz SF_6



Wymagania

- Bezpieczeństwo
- Ekonomiczne
- Elektryczne
- Mechaniczne
- Termiczne
- Przetwórcze
- Środowiskowe



[2]

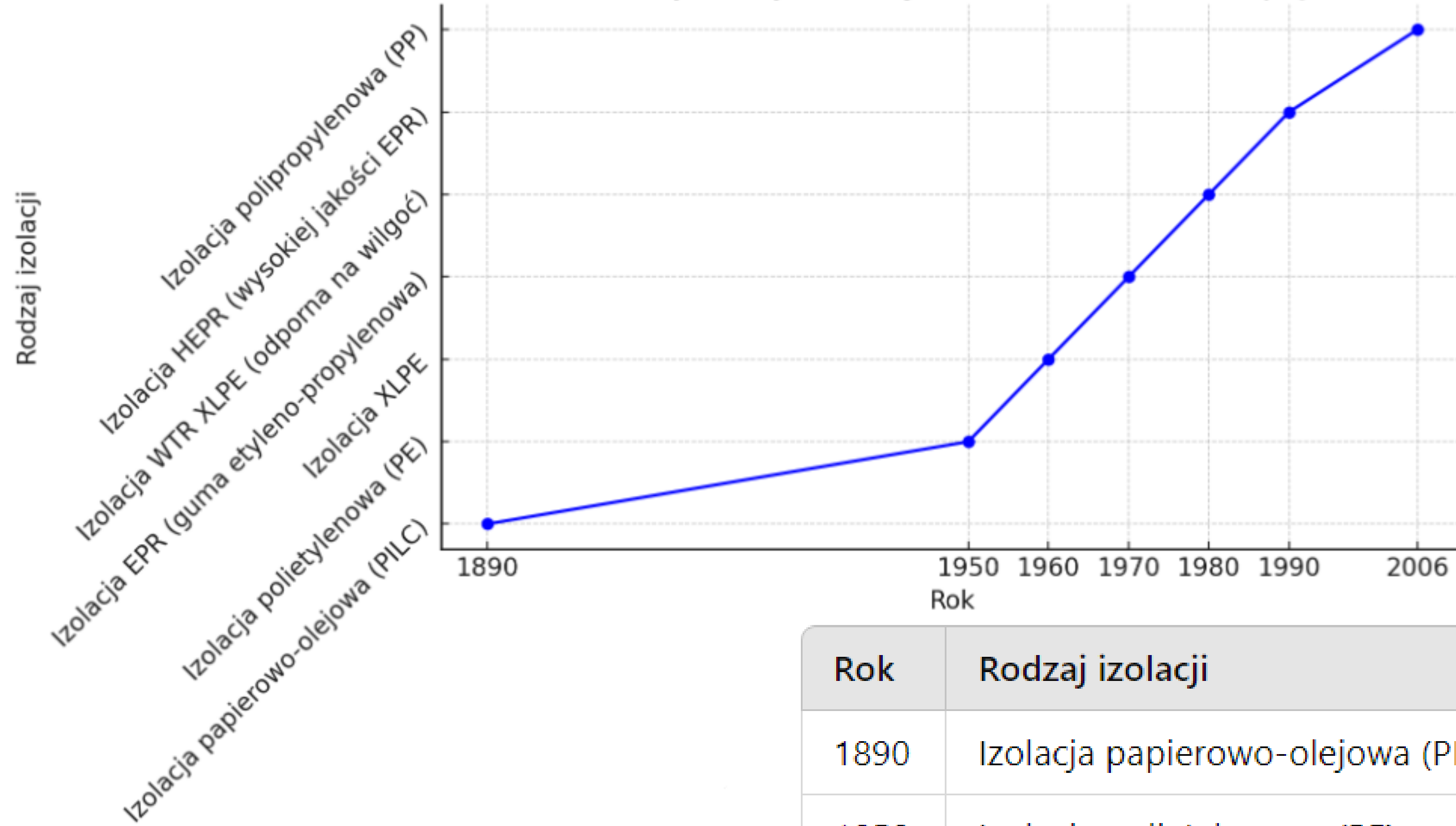
Układ okresowy pierwiastków chemicznych

1																	18										
2,1 1 H wodór 1,008																	2 He hel 4,003										
1,0 3 Li lit 6,941	1,5 4 Be beryl 9,012											2,0 5 B bor 10,811	2,5 6 C węgiel 12,011	3,0 7 N azot 14,007	3,5 8 O tlen 15,999	4,0 9 F fluor 18,998	10 Ne neon 20,180										
0,9 11 Na sód 22,990	1,2 12 Mg magnez 24,305											1,5 13 Al glin 26,982	1,8 14 Si krzem 28,085	2,1 15 P fosfor 30,974	2,5 16 S siarka 32,065	3,0 17 Cl chlor 35,453	3,5 18 Ar argon 39,948										
0,9 19 K potas 39,098	1,0 20 Ca wapń 40,078	1,3 21 Sc skand 44,956	1,5 22 Ti tytan 47,867	1,7 23 V wanad 50,942	1,8 24 Cr chrom 51,996	1,9 25 Mn mangan 54,938	2,0 26 Fe żelazo 55,845	2,0 27 Co kobalt 58,933	1,9 28 Ni nikiel 58,693	1,9 29 Cu miedź 63,546	1,6 30 Zn cynk 65,39	1,6 31 Ga gal 69,723	1,8 32 Ge german 72,61	2,0 33 As arsen 74,922	2,4 34 Se selen 78,96	2,8 35 Br brom 79,904	3,6 36 Kr krypton 83,798										
0,8 37 Rb rubid 85,468	0,9 38 Sr stront 87,62	1,3 39 Y itr 88,906	1,4 40 Zr cyrkon 91,224	1,6 41 Nb niob 92,906	2,0 42 Mo molibden 95,94	1,9 43 Tc technet 97,905	2,2 44 Ru ruten 101,07	2,2 45 Rh rod 102,906	2,2 46 Pd pallad 106,42	1,9 47 Ag srebro 107,868	1,7 48 Cd kadm 112,411	1,7 49 In ind 114,818	1,8 50 Sn cyna 118,710	2,1 51 Sb antymon 121,760	2,4 52 Te tellur 127,60	2,5 53 I jod 126,904	5,4 54 Xe ksenon 131,293										
0,7 55 Cs cez 132,905	0,9 56 Ba bar 137,327	1,1 57 La lantan 138,905	1,3 72 Hf hafn 178,49	1,5 73 Ta tantal 180,948	2,0 74 W wolfram 183,84	1,9 75 Re ren 186,207	2,2 76 Os osm 190,23	2,2 77 Ir iryd 192,217	2,2 78 Pt platyna 195,084	2,4 79 Au złoto 196,967	1,9 80 Hg rtęć 200,59	1,8 81 Tl tal 204,383	1,8 82 Pb ołów 207,2	1,9 83 Bi bizmut 208,980	2,0 84 Po polon 208,982	2,2 85 At astat 209,987	8,6 86 Rn radon 222,018										
0,7 87 Fr frans 223,020	0,9 88 Ra rad 226,025	1,1 89 Ac aktyn 227,028	1,1 104 Rf rutherford 261,11	1,5 105 Db dubn 263,11	2,0 106 Sg seaborg 265,12	1,9 107 Bh bohr 264,10	2,2 108 Hs has 269,10	2,2 109 Mt meitner 268,10	1,0 110 Ds darmstadt 281,10	1,1 111 Rg roentgen 280	1,2 112 Cn kopernik 285	1,2 113 Nh nihonium 284	1,2 114 Fl flerowium 289	1,2 115 Mc moscovium 288	1,2 116 Lv livermorium 292	1,1 117 Ts tennessine 294	1,2 118 Og oganeson 294										
1,1 58 Ce cer 140,116	1,1 59 Pr prazeodym 140,908	1,2 60 Nd neodym 144,242	1,2 61 Pm promet 144,913	1,2 62 Sm samar 150,36	1,0 63 Eu europ 151,964	1,1 64 Gd gadolin 157,25	1,2 65 Tb terb 158,925	1,2 66 Dy dysproz 165,5	1,2 67 Ho holm 164,930	1,2 68 Er erb 167,259	1,2 69 Tm tul 168,934	1,1 70 Yb iterb 173,04	1,2 71 Lu lutet 174,967	1,3 90 Th tor 232,038	1,5 91 Pa protaktyn 231,036	1,7 92 U uran 238,029	1,4 93 Np neptun 237,048	1,3 94 Pu pluton 244,064	9,5 95 Am ameryk 243,061	9,6 96 Cm kiur 247,070	9,7 97 Bk berkel 247,1	9,8 98 Cf kaliforn 251,080	9,9 99 Es einstein 252,088	10,0 100 Fm ferm 257,095	10,1 101 Md mendelew 258,098	10,2 102 No nobel 259,101	10,3 103 Lr lorens 262,110

metale
gazy
niemetale
cieczce

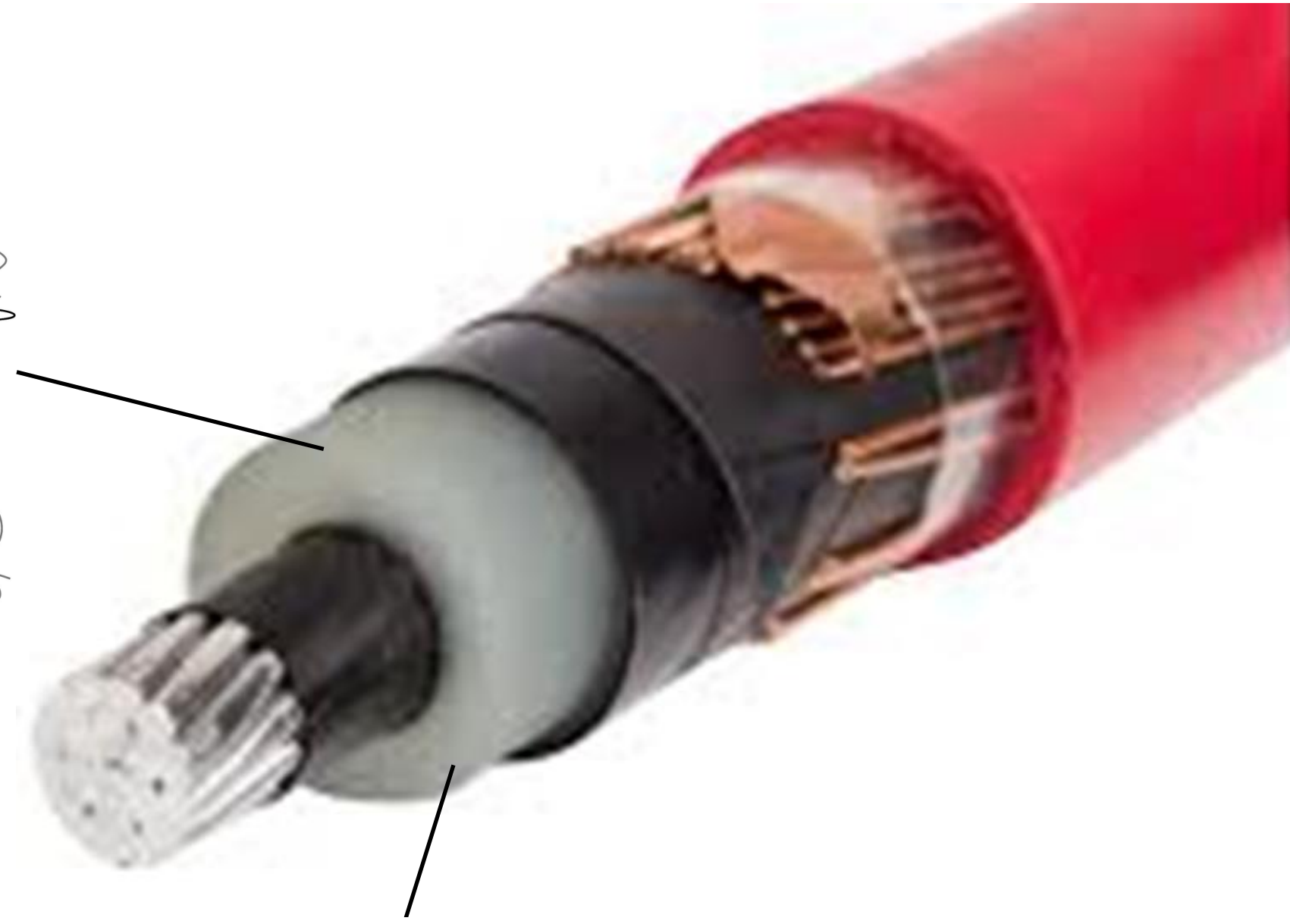
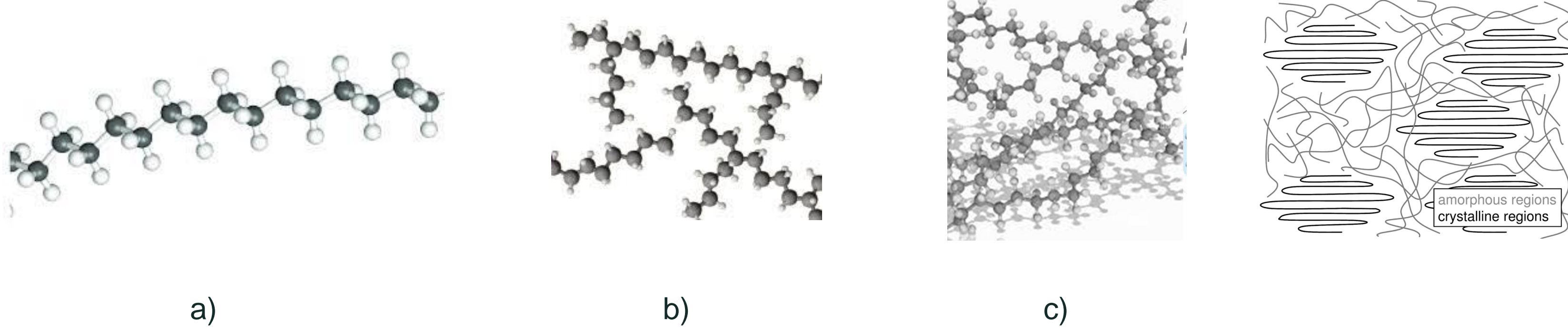
PIKADEMIA

Rozwój izolacji kablowych dla kabli średnich napięć

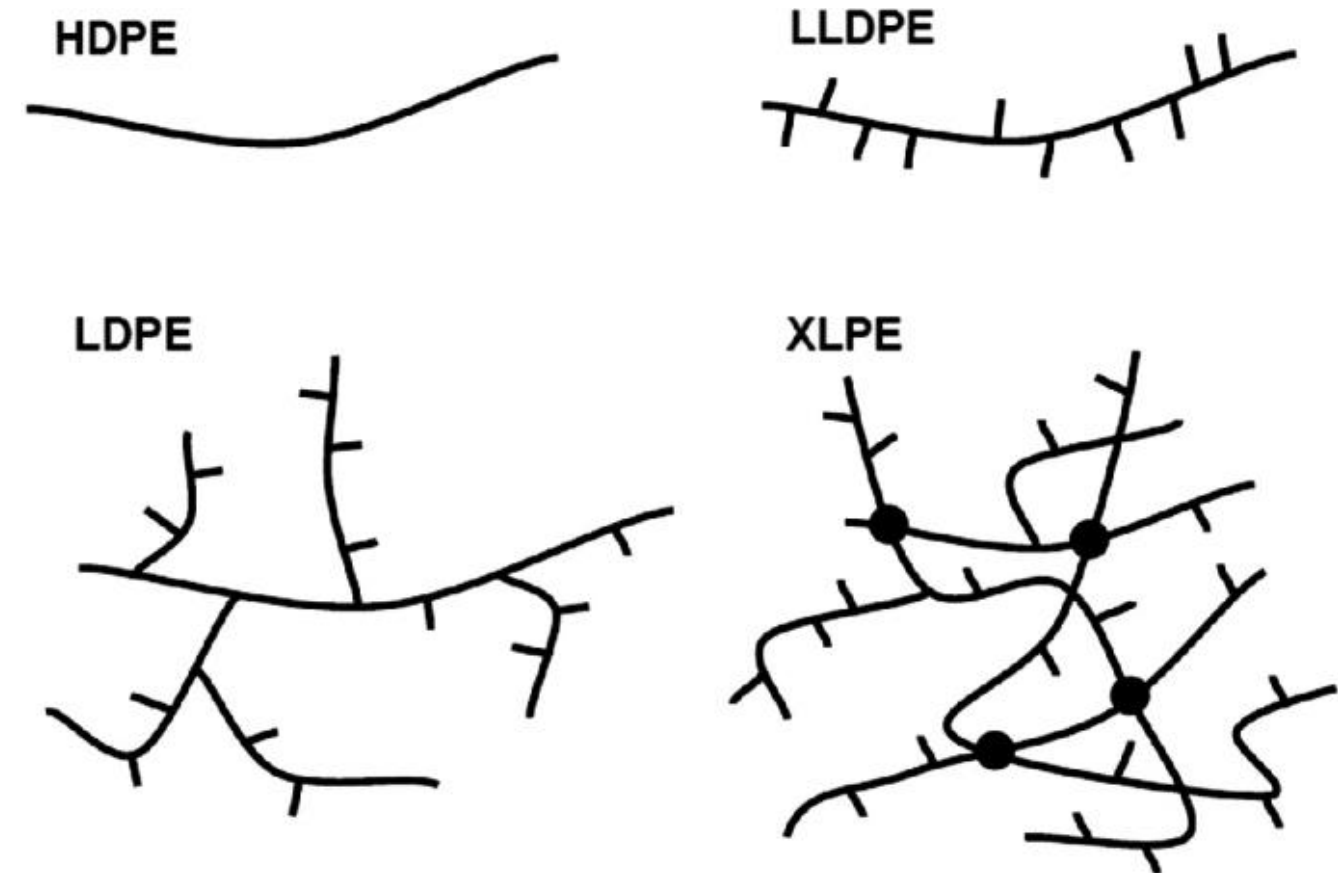


Rok	Rodzaj izolacji	Rezystywność $\Omega \cdot m$	Max temperatura pracy (°C)
1890	Izolacja papierowo-olejowa (PILC)	$\sim 10^{10} - 10^{12}$	80 - 85 °C
1950	Izolacja polietylenowa (PE)	$\sim 10^{14} - 10^{16}$	70 - 75 °C
1960	Izolacja XLPE	$\sim 10^{16} - 10^{17}$	90 - 105 °C
1970	Izolacja EPR (guma etyleno-propylenowa)	$\sim 10^{14} - 10^{15}$	90 - 105 °C
1980	Izolacja WTR XLPE (odporna na wilgoć)	$\sim 10^{16} - 10^{17}$	90 - 105 °C
1990	Izolacja HEPR (wysokiej jakości EPR)	$\sim 10^{14} - 10^{15}$	90 - 110 °C
2006	Izolacja polipropylenowa (PP)	$\sim 10^{16} - 10^{17}$	90 - 105 °C

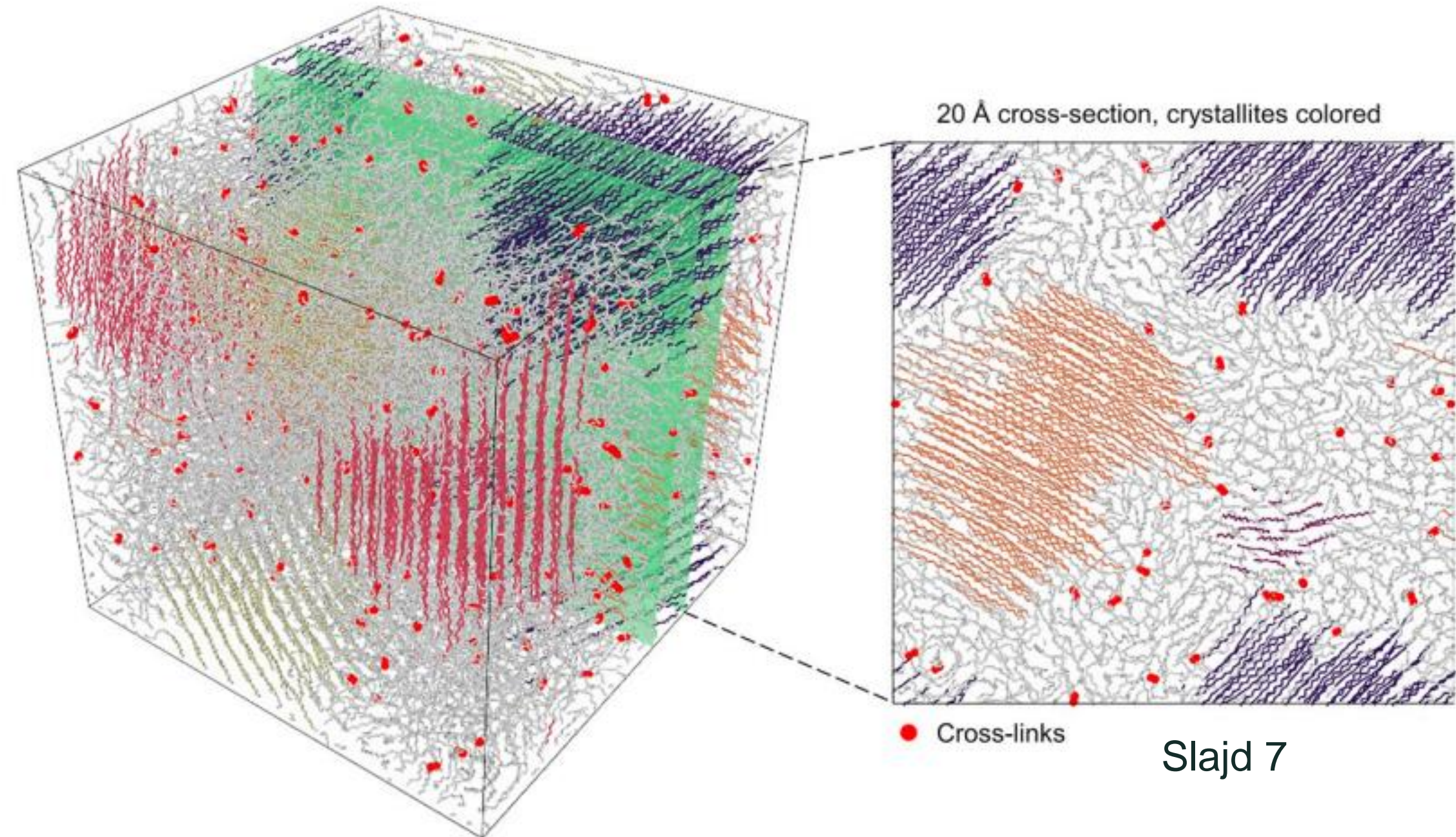
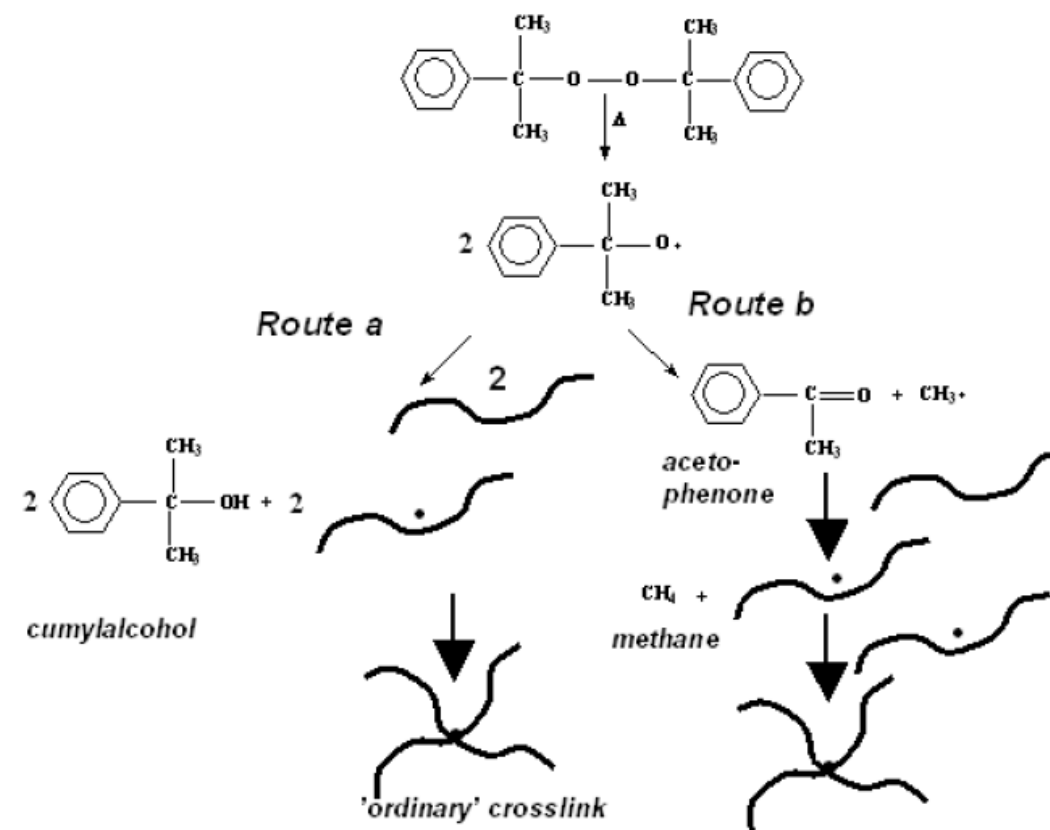
Polietyleny



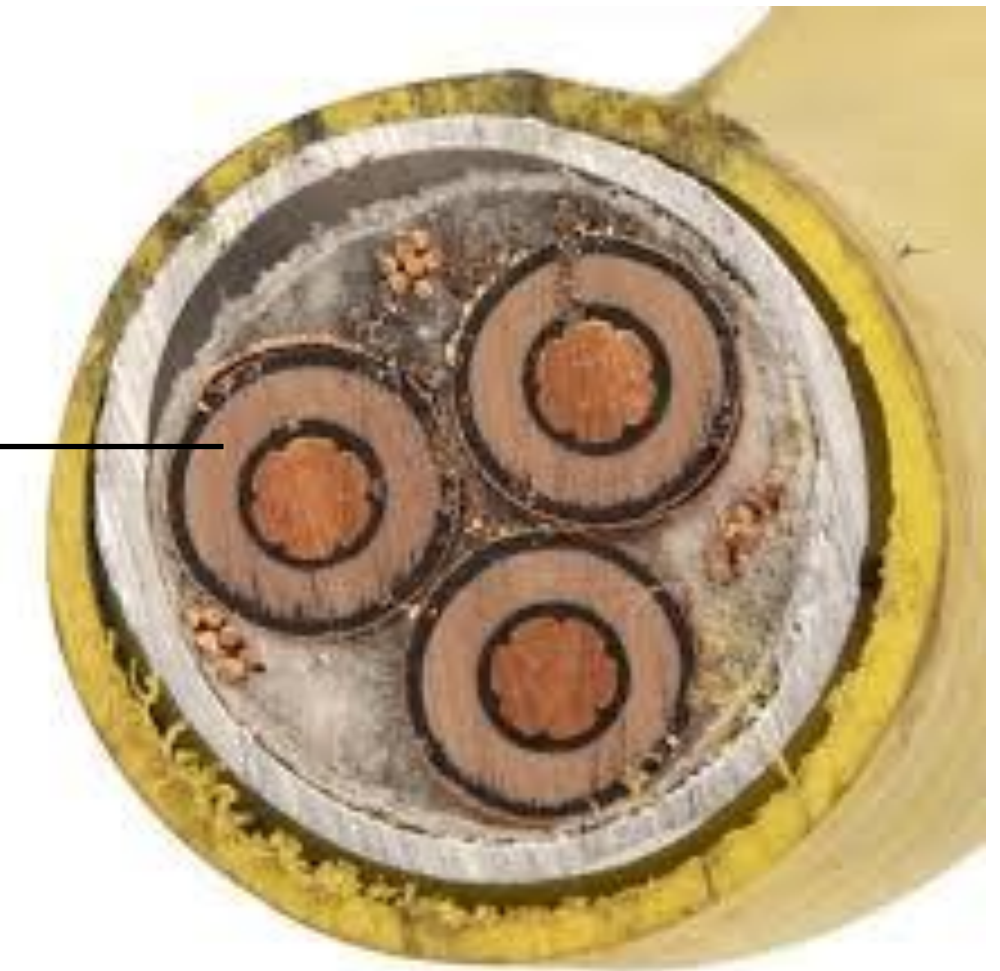
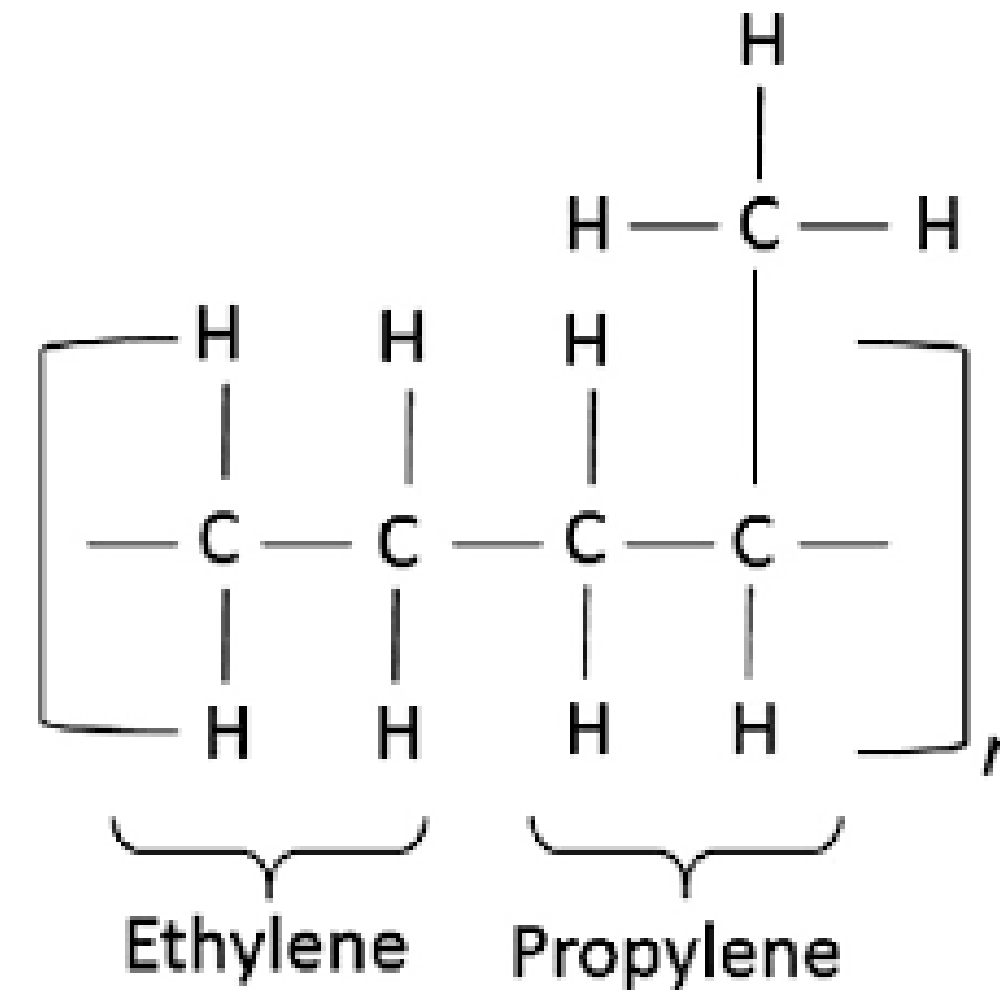
Różne struktury polietylenu



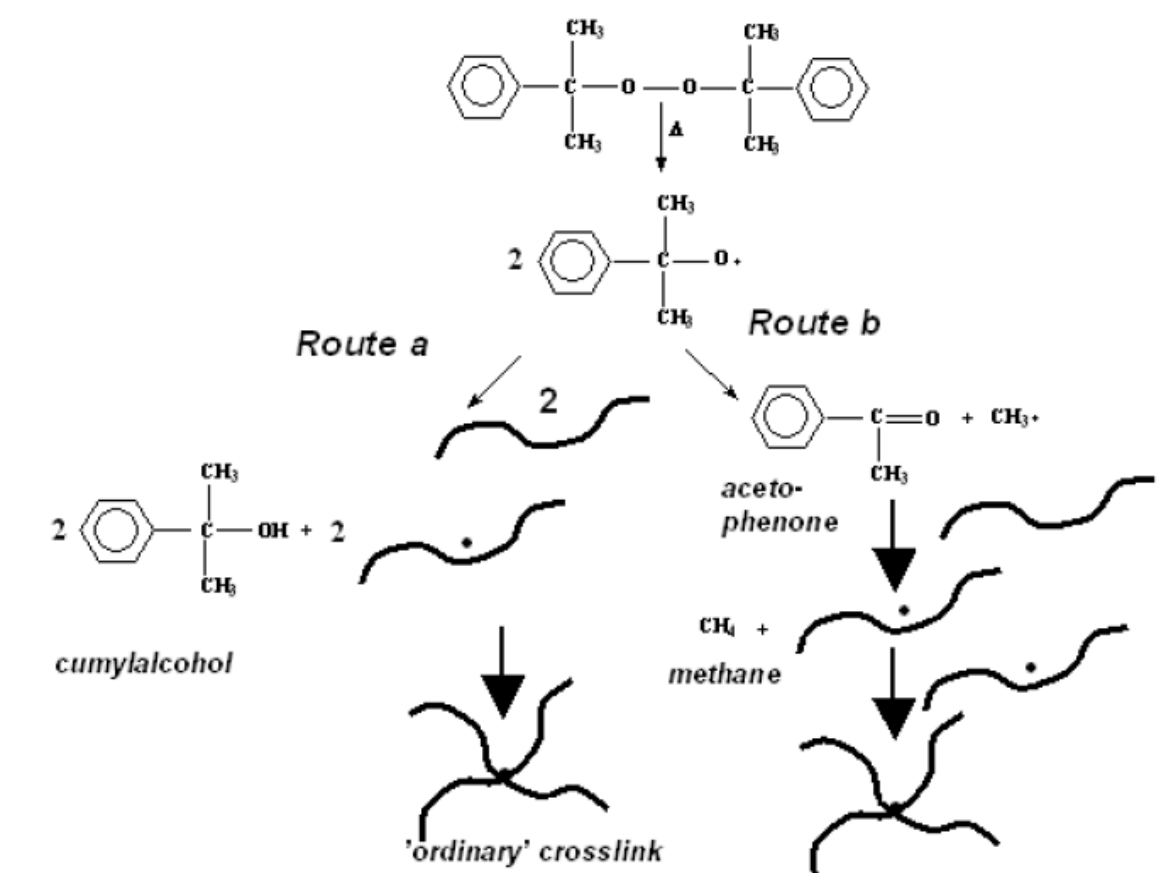
XLPE



Guma EPR



EPR	XLPE
Niższa rezystywność	Wyższa rezystywność
Wyższy współczynnik strat dielektrycznych	Niższy współczynnik strat dielektrycznych
Niższa zawartość fazy krystalicznej	Wyższa zawartość fazy krystalicznej
Zachowuje kształt do temperatury 120stC	Zachowuje kształt do temperatury 105stC
Niższa rozszerzalność termiczna	Wyższa rozszerzalność termiczna
Bardziej giętki	Mniej giętki
Niższy dopuszczalny minimalny promień gięcia	Wyższy dopuszczalny minimalny promień gięcia



Izolacja termoplastyczna

Termoplasty – w określonej temperaturze i ciśnieniu zaczynają mieć właściwości lepkiego płynu. Można je kształtować przez tłoczenie i wtryskiwanie w podwyższonej temperaturze, a następnie szybkie schłodzenie do temperatury użytkowej. Można je przetwarzać wielokrotnie, w przeciwieństwie do duroplastów, w przeciwieństwie do elastomerów nie są podatne na odkształcenia w wyniku naprężenia

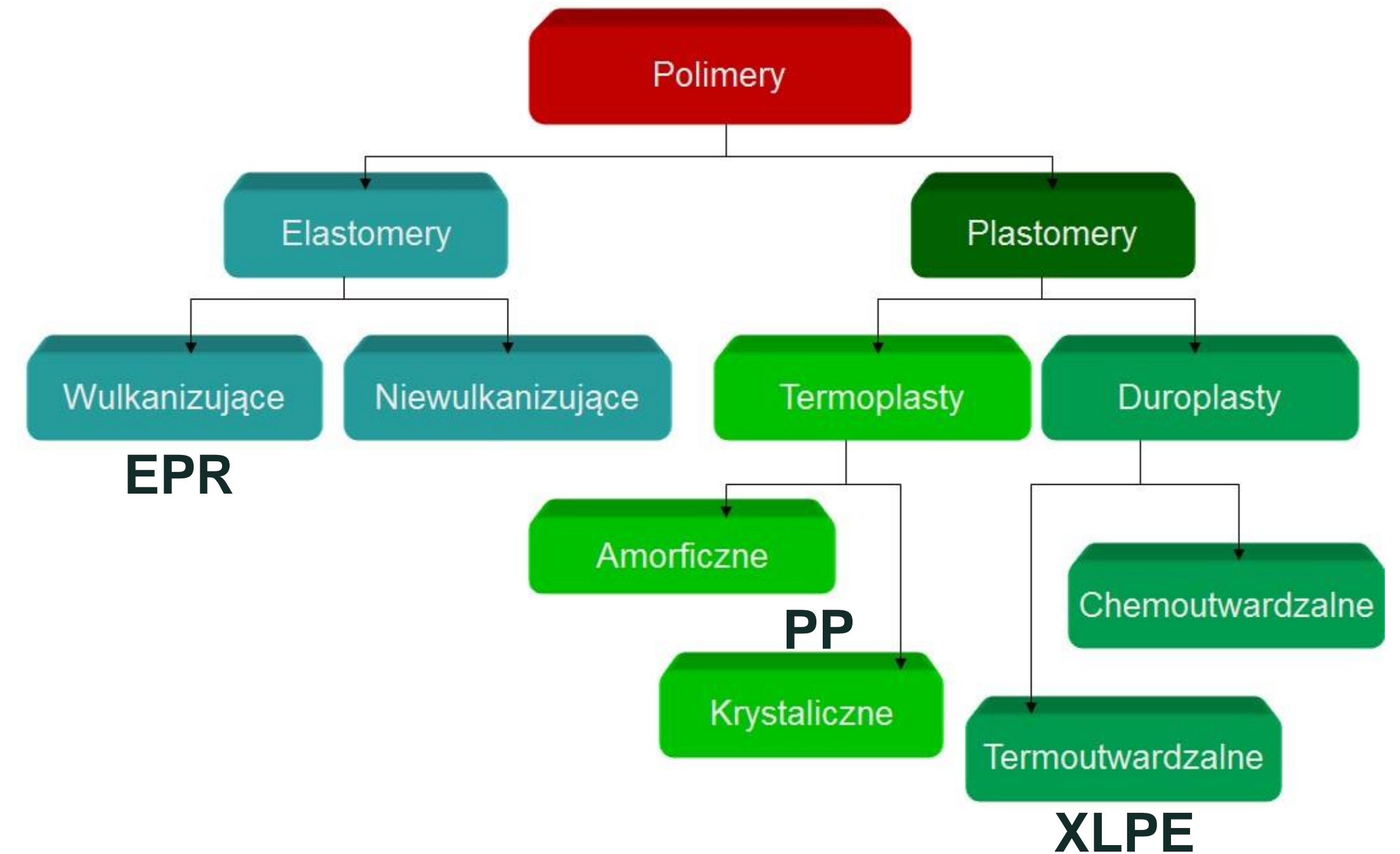
Zalety

- Brak procesu sieciowania i odgazowania
- Łatwość recyklingu
- Podwyższenie max temp pracy żyły do 110stC
- Kompatybilność z kablami izolowanymi XLPE
- Właściwości dielektryczne porównywalne z PE

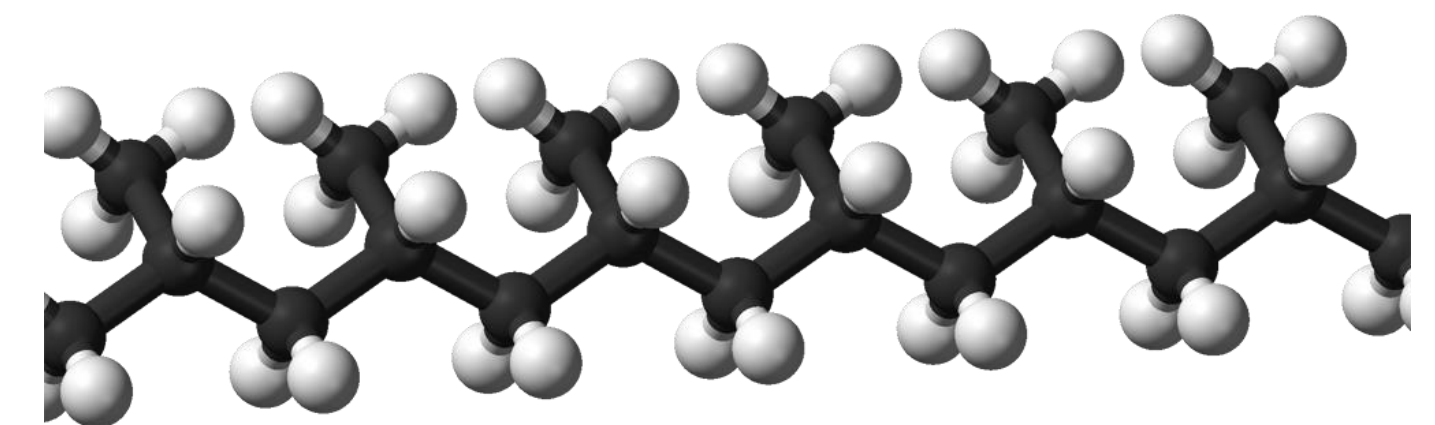
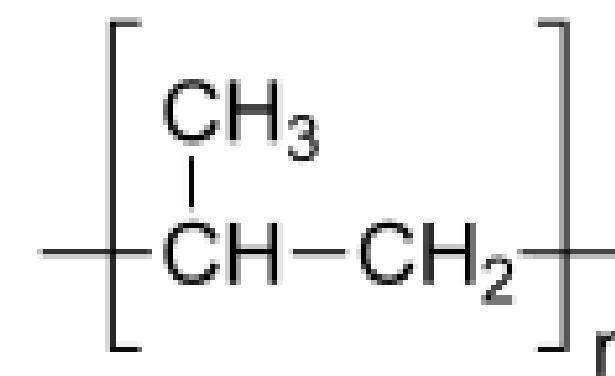
Wady

- Wzrost kruchości w niskich temperaturach
- Niska odporność na starzenie
- Niskie przewodnictwo cieplne

Podział polimerów



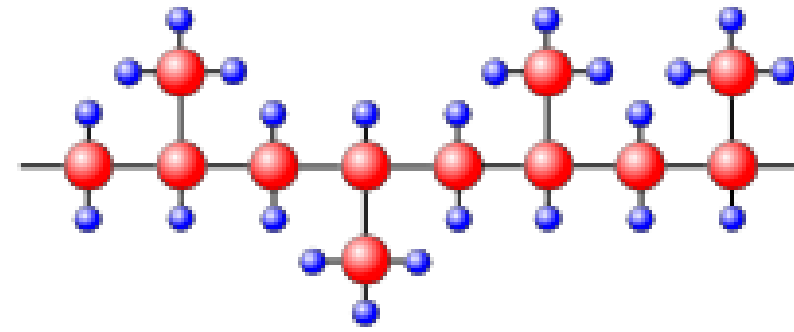
Polipropylen



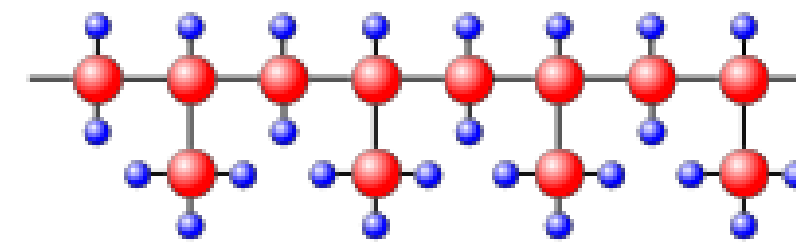
Zupa



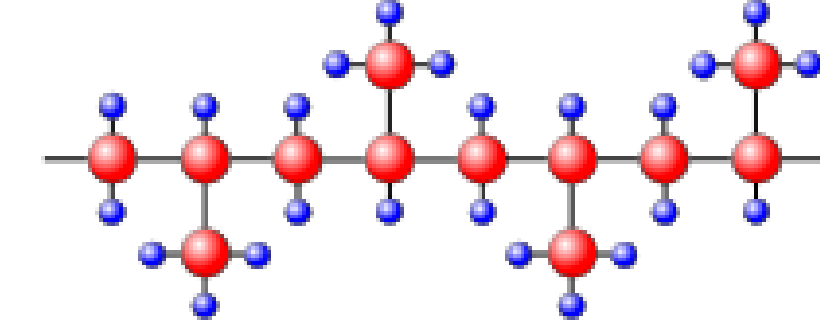
Odmiany PP



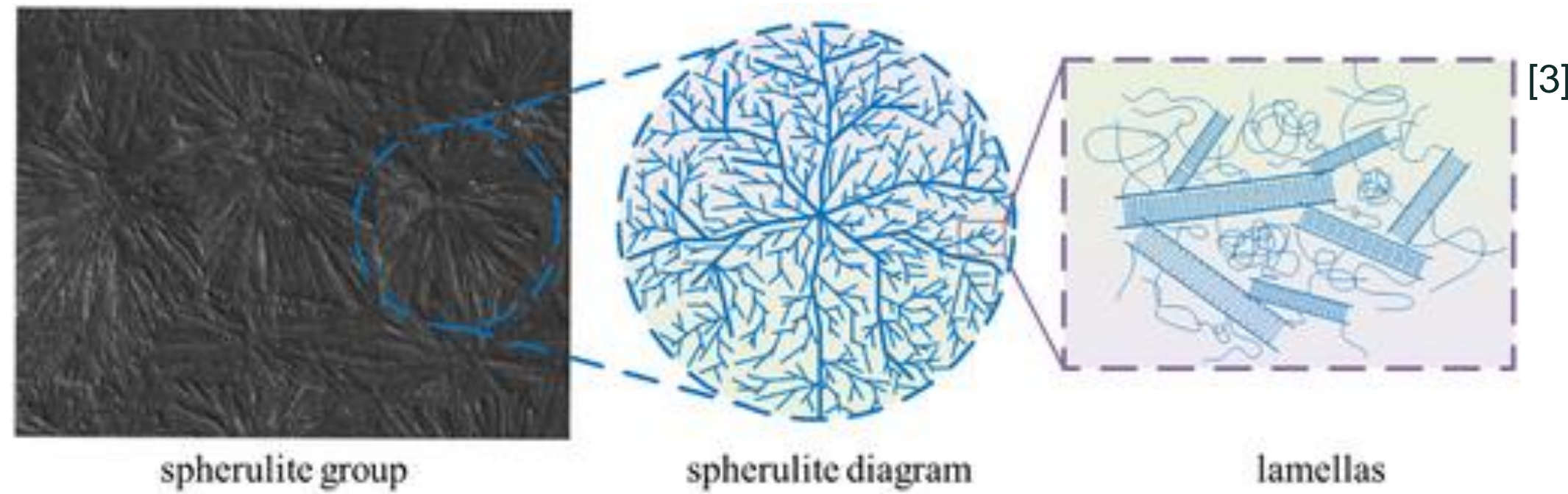
a) ataktyczny



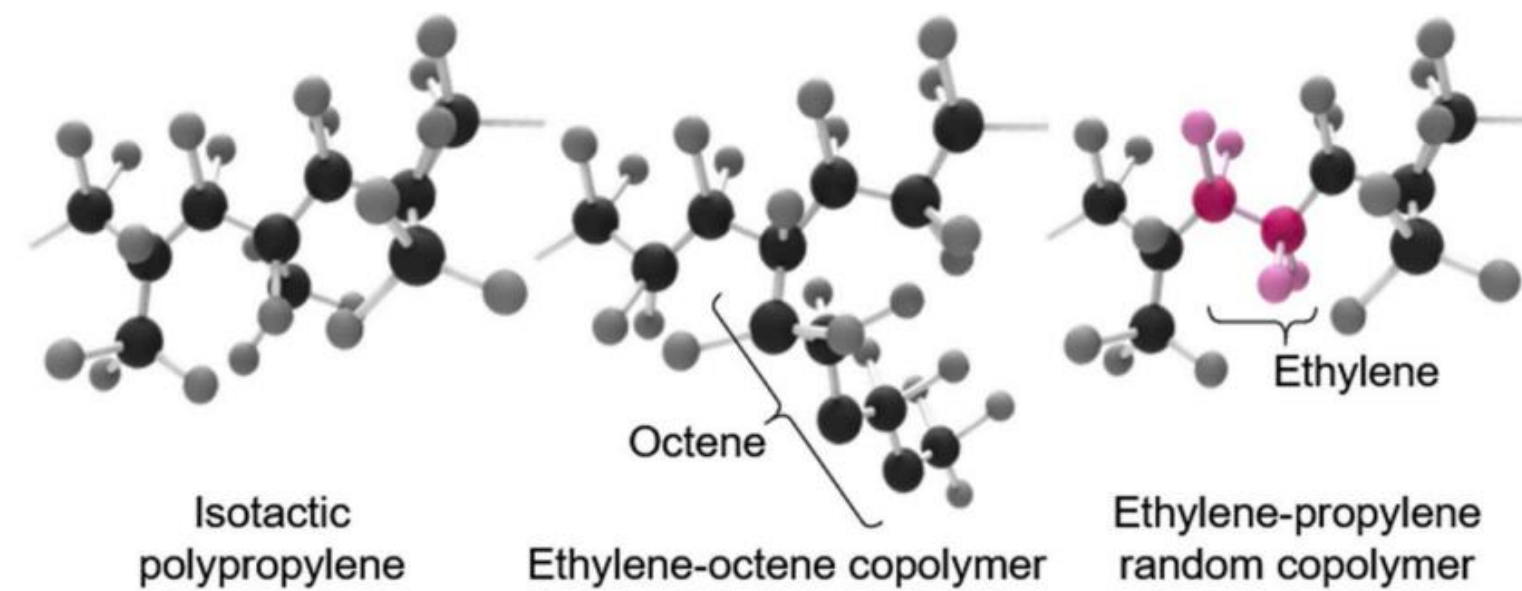
b) izotaktyczny



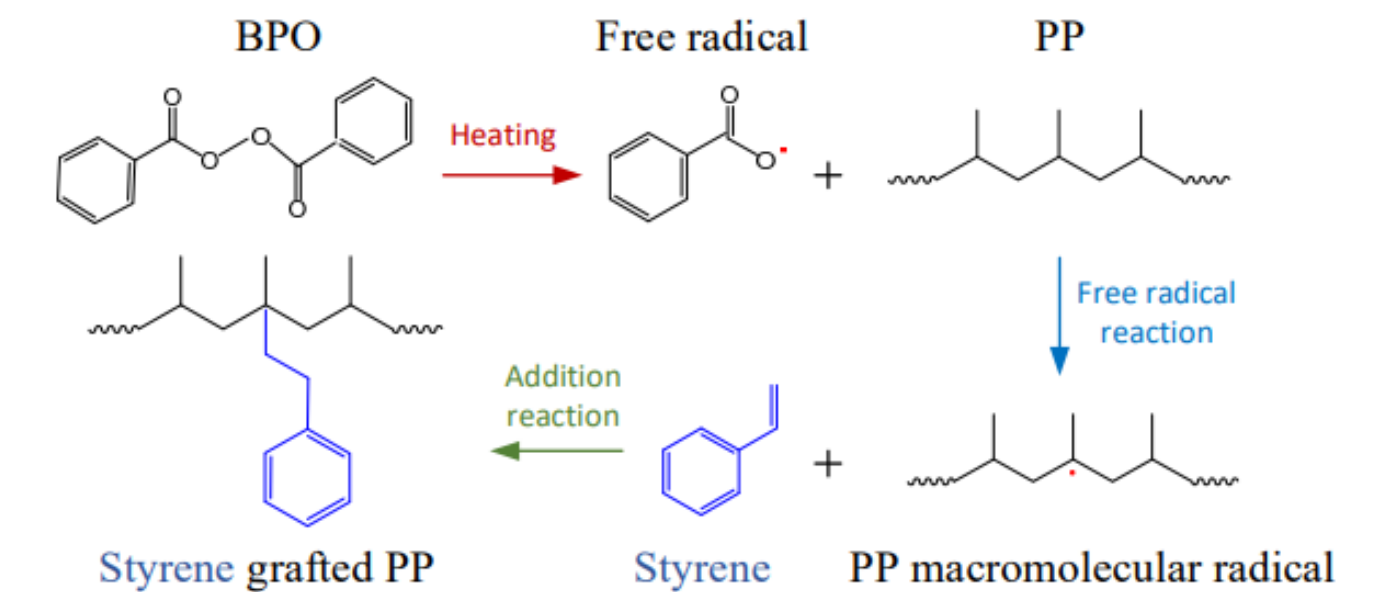
c) syndiotaktyczny



Kopolimery



[4]



[5]

[3] Eco-friendly polypropylene power cable insulation: Present status and perspective Jianying Li | Kai Yang | Kangning Wu | Zhenghong Jing | Jin-Yong Dong

[4] Insulative ethylene-propylene copolymer-nanostructured polypropylene for high-voltage cable insulation applications Seunggun Yu *, Seong Hwan Lee, Jin Ah Han, Myung Sang Ahn, Hoyyul Park, Se Won Han **, Dae Ho Lee

[5] Comprehensive Properties of Grafted Polypropylene Insulation Materials for AC/DC Distribution Power Cables Shangshi Huang,*, Yuxiao Zhou, Shixun Hu, Hao Yuan, Jun Yuan, Changlong Yang, Jun Hu, Qi Li and Jinliang He

Normy i specyfikacje

Enel - HPTE

GLOBAL STANDARD UNDERGROUND MEDIUM VOLTAGE CABLES

5.3 Insulation

The insulation shall be applied by a suitable extrusion process, and shall form a compact and homogenous body. In addition, it shall be possible to remove it without creating any damage to the conductor.

The insulating material shall be:

Type I and Type III: cross-linked polyethylene; compliant with the characteristics required herein this document. Such XLPE compound complies all the characteristics described in Standard IEC 60502-2 and standard HD 620 S2 part 1 for DIX 3 compound.

The XLPE insulation must allow maximum conductor temperatures of 90 °C in normal operation and 250 °C under short circuit condition by at least 5 seconds.

Type II: high performance polypropilene thermoplastic elastomer (HPTE) in compliance with standard CEI 20-86

The insulation minimum thickness measured and accepted at any point of the cable shall not be less than 90% of the nominal value minus 0,1 mm.

PN-HD 620 S3:2023 – PP-TPE

Kable elektroenergetyczne o izolacji wytłaczanej na napięcia znamionowe od 3,6/6 (7,2) kV do 20,8/36 (42) kV

2 Definitions

2.1 Definitions concerning the insulating and sheathing compounds

2.1.1 Insulating and sheathing compounds

The types of insulating and sheathing compounds covered by this HD are listed in Table 2.1.1 and Table 2.1.2 respectively, together with their abbreviated designations:

Table 2.1.1 – Insulating compounds

Insulating compounds	See table for requirements:
a) <i>Cross-linked:</i> Insulating compounds based on: <ul style="list-style-type: none"> - Cross-linked polyethylene (XLPE) - Ethylene propylene rubber (EPR) - Hard ethylene propylene rubber (HEPR) 	Table 2A Table 2B Table 2C
b) <i>Thermoplastic:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Polypropylene Thermoplastic Elastomer (PP-TPE) 	Table 2D

Historycznie

- MIND Mass Impregnated Non Draining insulation (<math><55^{\circ}\text{C}</math>)

Papier celulozowy suszony próżniowo, następnie impregnowany lepkiem olejem (i żywicą dla właściwości nieodwadniających)

- Oil-Filled insulation (<math><90^{\circ}\text{C}</math>)

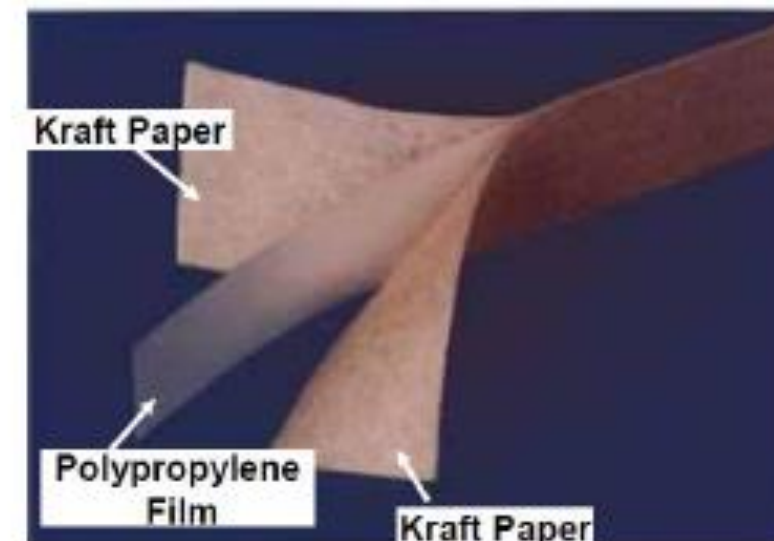
Papier nasączony olejem o niskiej lepkości, olej pompowany przez żyłę roboczą, ograniczenie do 100km odcinka

- Polypropylene-Paper Laminate (<math><80-85^{\circ}\text{C}</math>)

PPL + środek impregnujący o właściwościach Nieodwadniających

- Extruded insulation (<math><90^{\circ}\text{C}</math>)

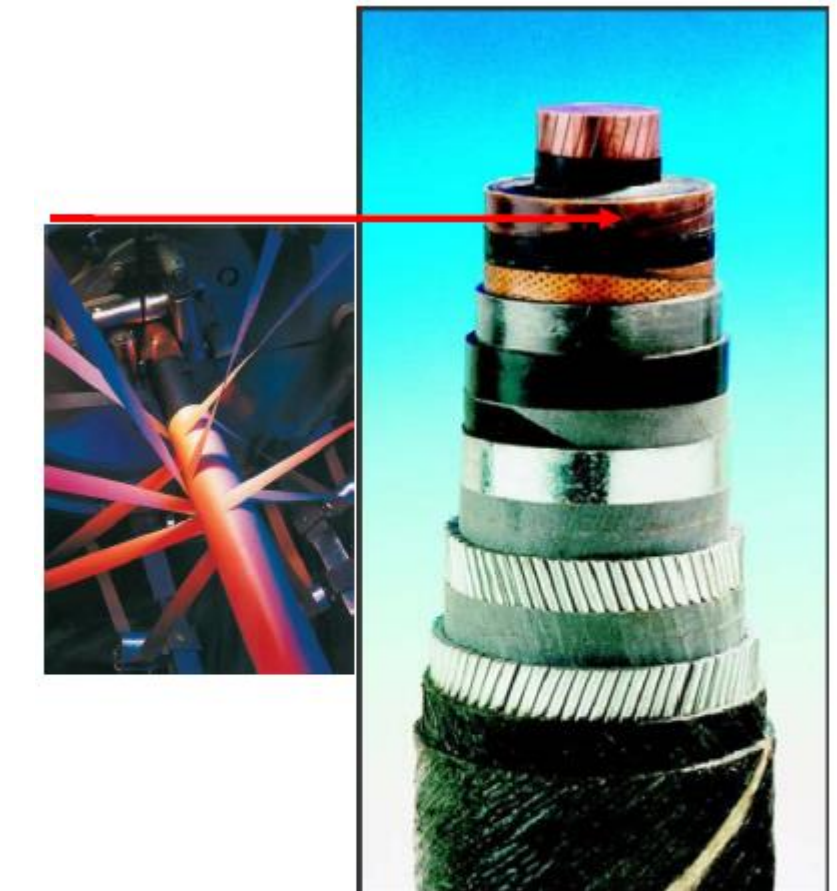
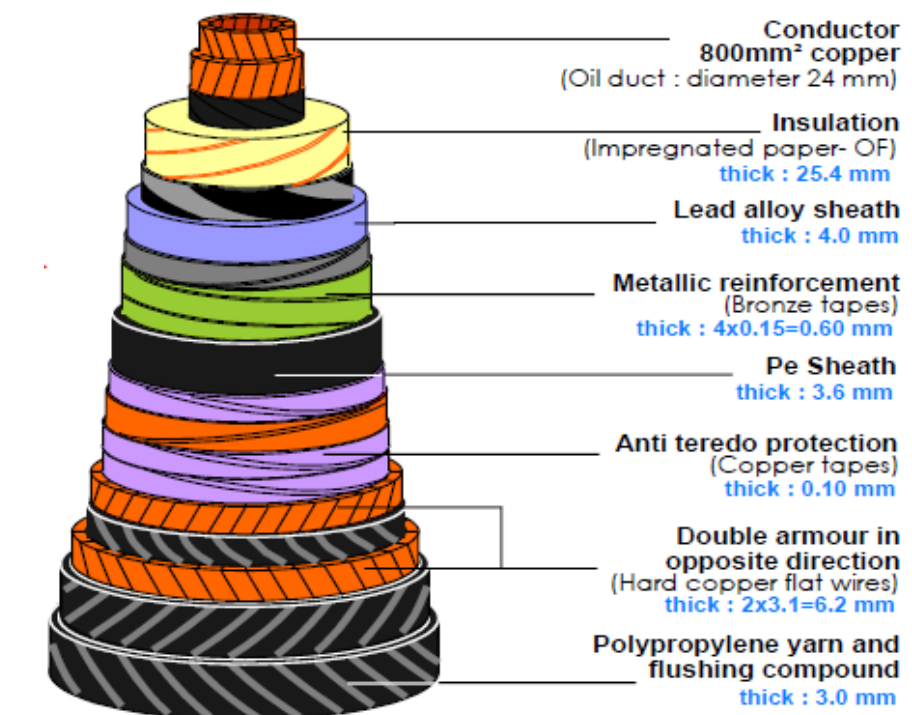
Wytłaczany polietylen sieciowany XLPE



Construction of DC $\pm 500\text{kV}$ 1GW PPLP Solid DC Cable

SPAIN MOROCCO INTERCONNECTION

A.C. Operation : 230/400 (420) kV - D.C. Operation : +/- 450 kV



450 kV dc, 600 MW
MIND cable
(Baltic Cable Subsea
HVDC Connection)
ABB

Dielektryk to materiał, który nie przewodzi prądu elektrycznego, ale może być polaryzowany w polu elektrycznym.

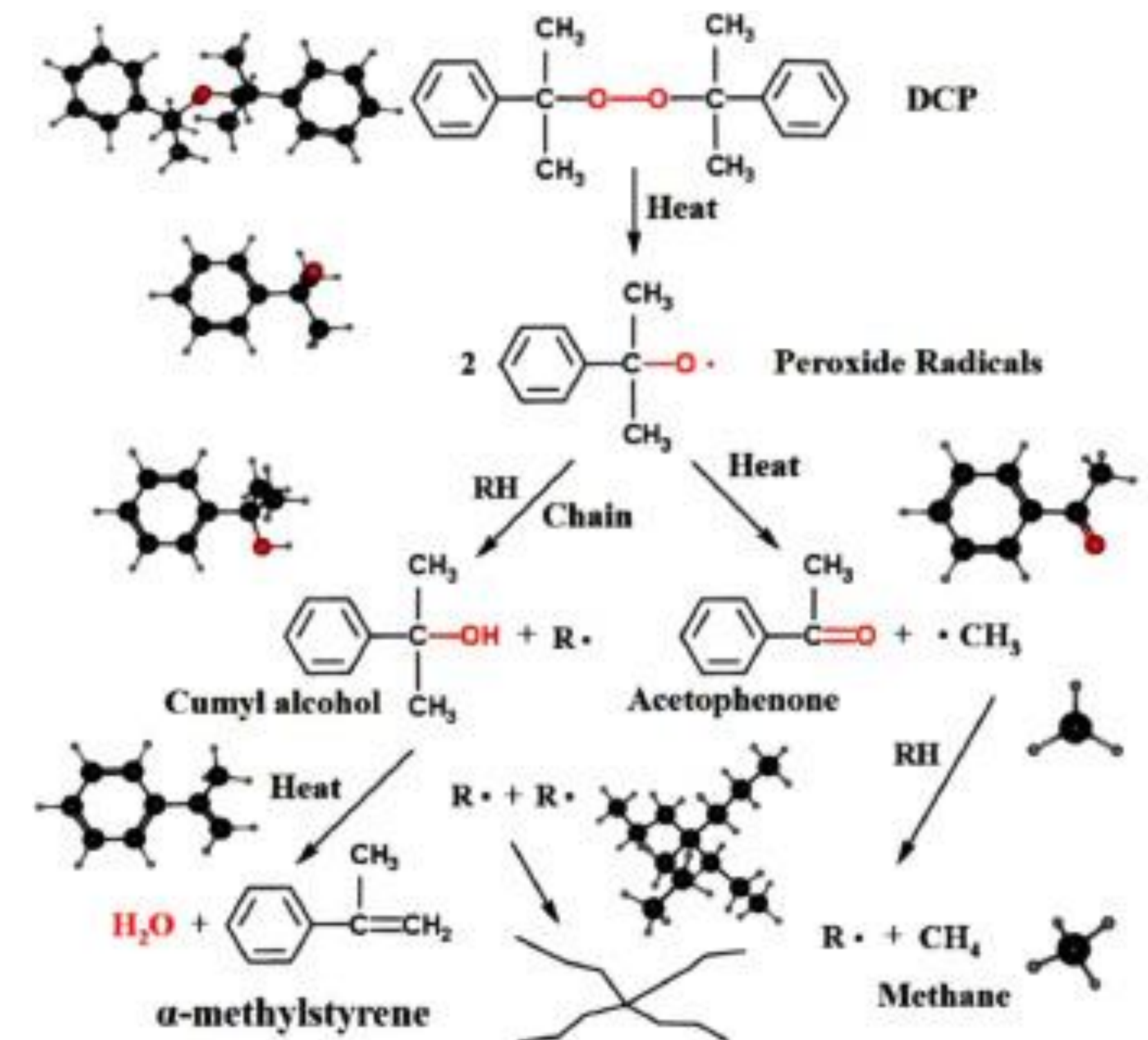
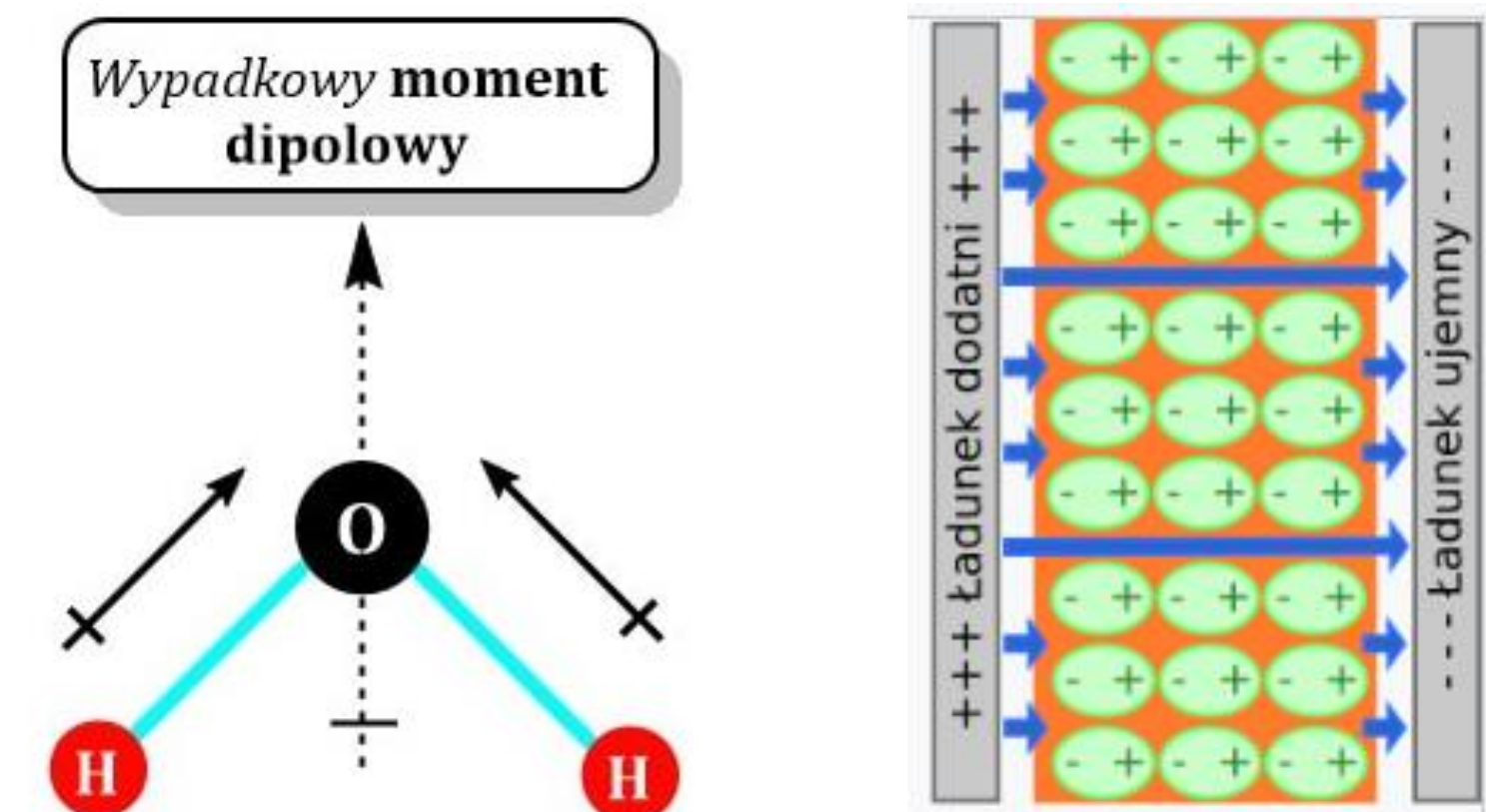
Polarność – właściwość indywidualnych cząsteczek chemicznych polegająca na występowaniu w nich elektrycznego momentu dipolowego w wyniku nierównomiernego rozłożenia cząstkowych ładunków elektrycznych w ich objętości.

Elektryczny moment dipolowy – wektorowa wielkość fizyczna charakteryzująca dipol elektryczny.

Polaryzacja dielektryczna – zjawisko polegające na utworzeniu dipoli elektrycznych lub orientacji już istniejących dipoli w reakcji na przyłożone pole elektryczne. W wyniku polaryzacji w dielektryku powstaje wewnętrzne pole elektryczne, które częściowo równoważy przyłożone zewnętrzne pole

Izolator to materiał, który skutecznie blokuje przepływ prądu elektrycznego, co oznacza, że ma bardzo wysoką oporność, nie muszą wykazywać polaryzacji, chociaż niektóre z nich mogą mieć właściwości dielektryczne.

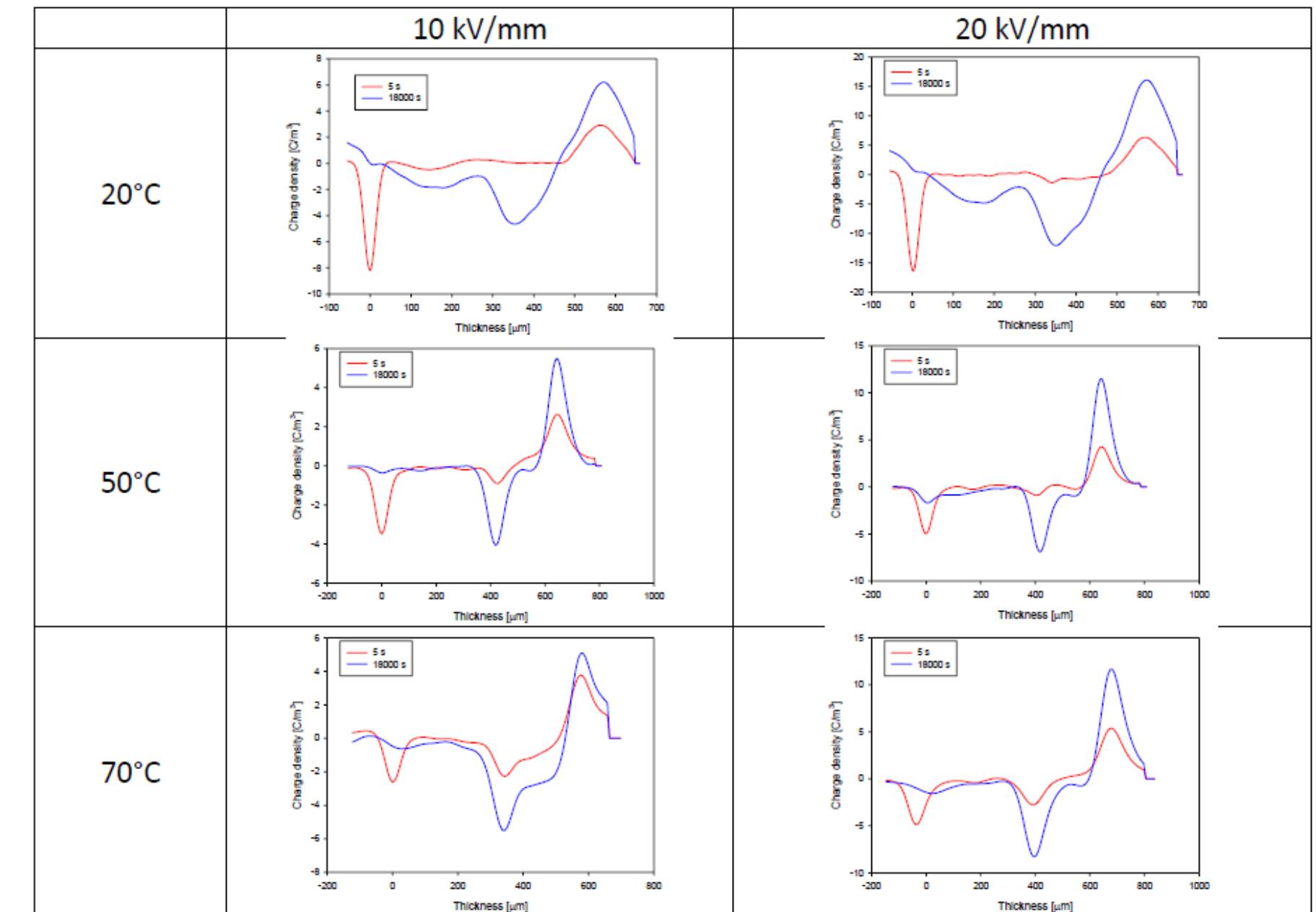
Każdy dielektryk jest izolatorem, ale nie każdy izolator jest dielektrykiem.



Ładunki przestrzenne

Dwa zasadnicze mechanizmy przejścia nośników prądu z elektrody do polimeru:

- poprzez barierę potencjału opisywany wzorem Schottky'ego (przejście nad barierą) lub Fowlera-Nordheima (przejście przez barierę – próg energii),
- przez wytworzenie ładunku wskutek jonizacji cząsteczek obojętnych gazu we wtrącinach powietrznych izolacji lub poprzez WNZ w miejscach niejednorodności prowadzące do pojawienia się nadmiarowego ładunku dodatniego lub ujemnego. Miejsca takich niejednorodności są zazwyczaj zlokalizowane na granicy elektrod i polimeru wskutek innego rozkładu temperatur w fazie krystalizacji na etapie produkcji.



Np.

Izolacja zaprojektowana dla pola elektrycznego $E = V/d = 50 \text{ kV/mm}$

Oczekiwana żywotność izolacji $t_{BD} = 40 \text{ lat}$

Ładunki przestrzenne + E_{SC} np. 10 kV/mm - maksymalne rzeczywiste pole $E = 60 \text{ kV/mm}$.

Jeśli $t_{BD} \sim E^{-n}$, $n = 10$ (CIGRE TB 496), rzeczywisty czas życia wyniósłby: $t_{BD} \text{ rzeczywisty} = 40 \cdot (60/50)^{-10} = 6,5 \text{ lat}$

Nawet jeśli rzeczywisty efekt jest niższy, akumulacja ładunku przestrzennego musi być kontrolowana i rzeczywisty rozkład pola wewnętrznego znany

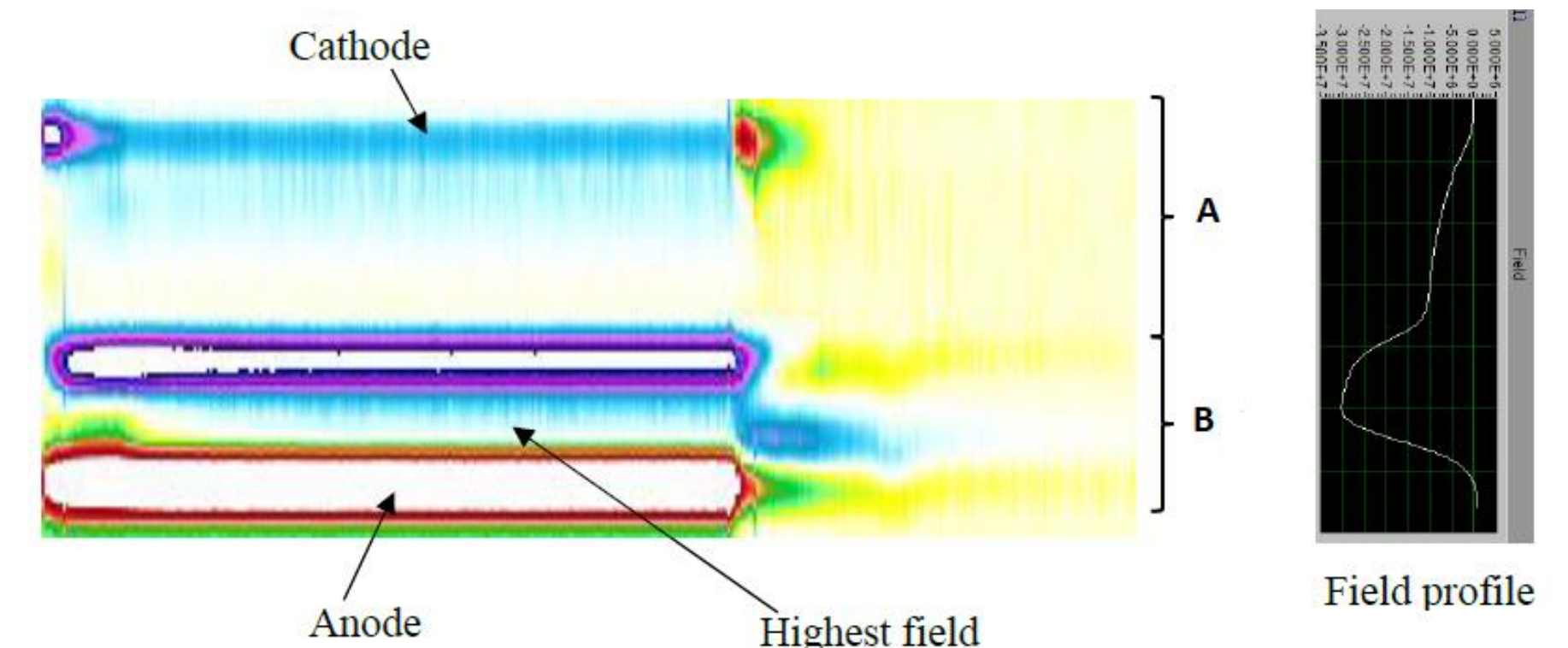
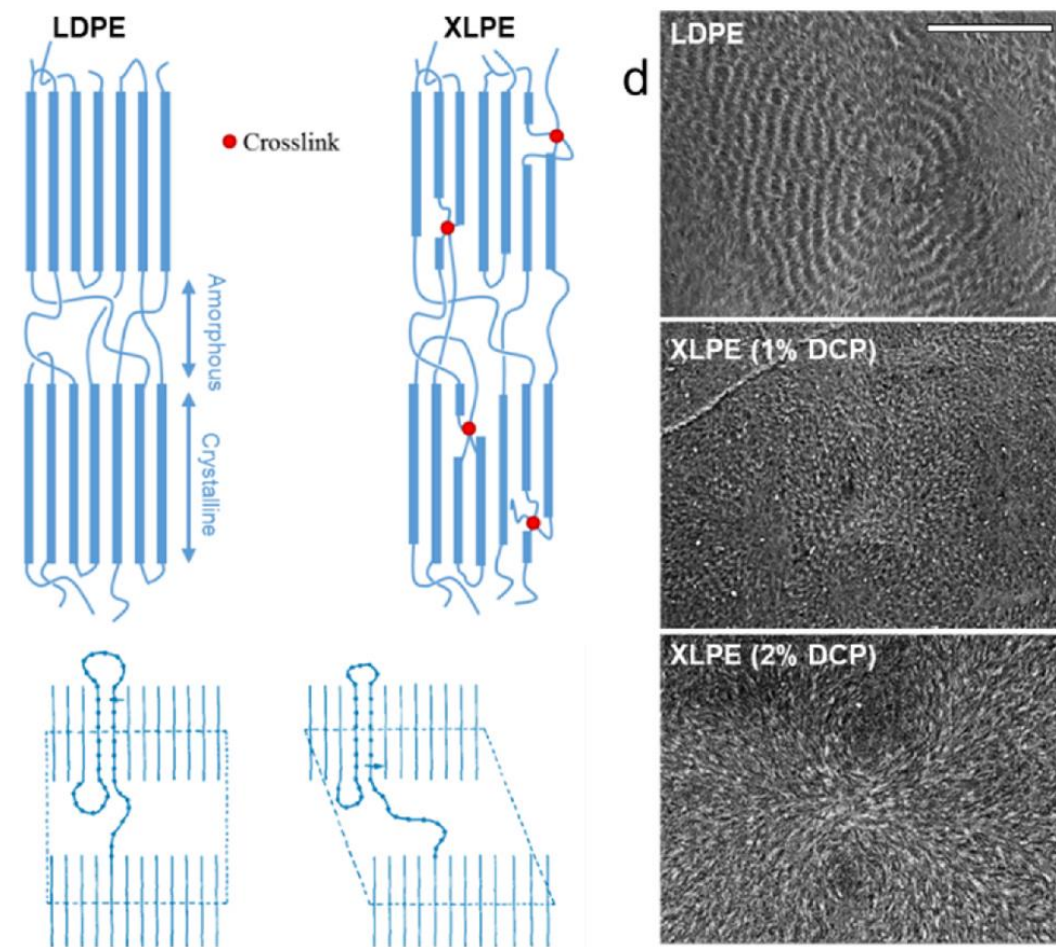


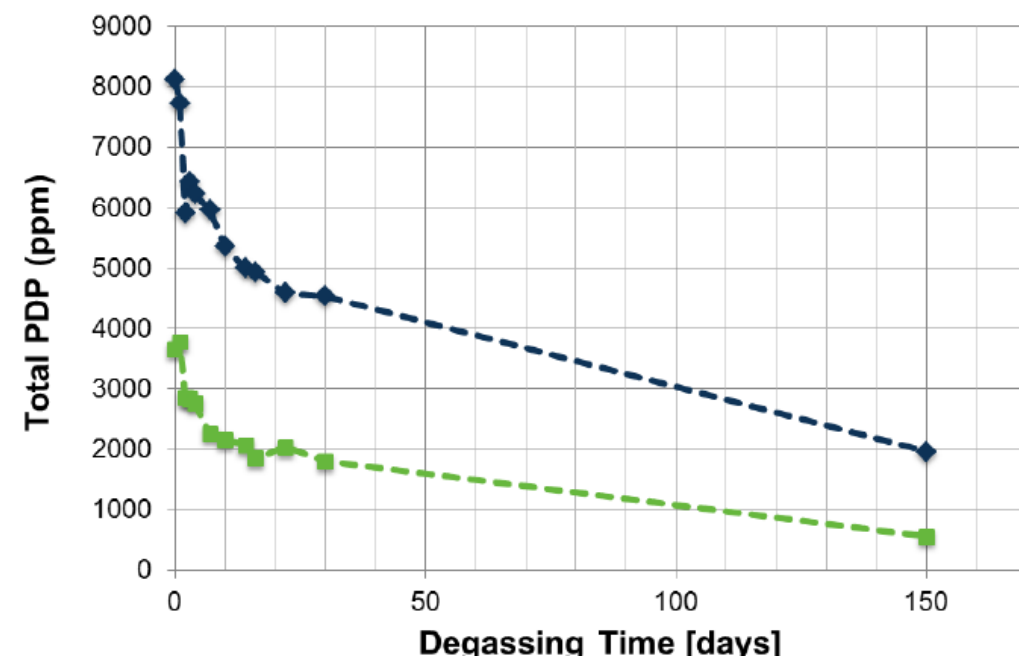
Figure 3.6. example of a space charge pattern, with the relevant electric field profile.

• Ładunki przestrzenne

LXLPE

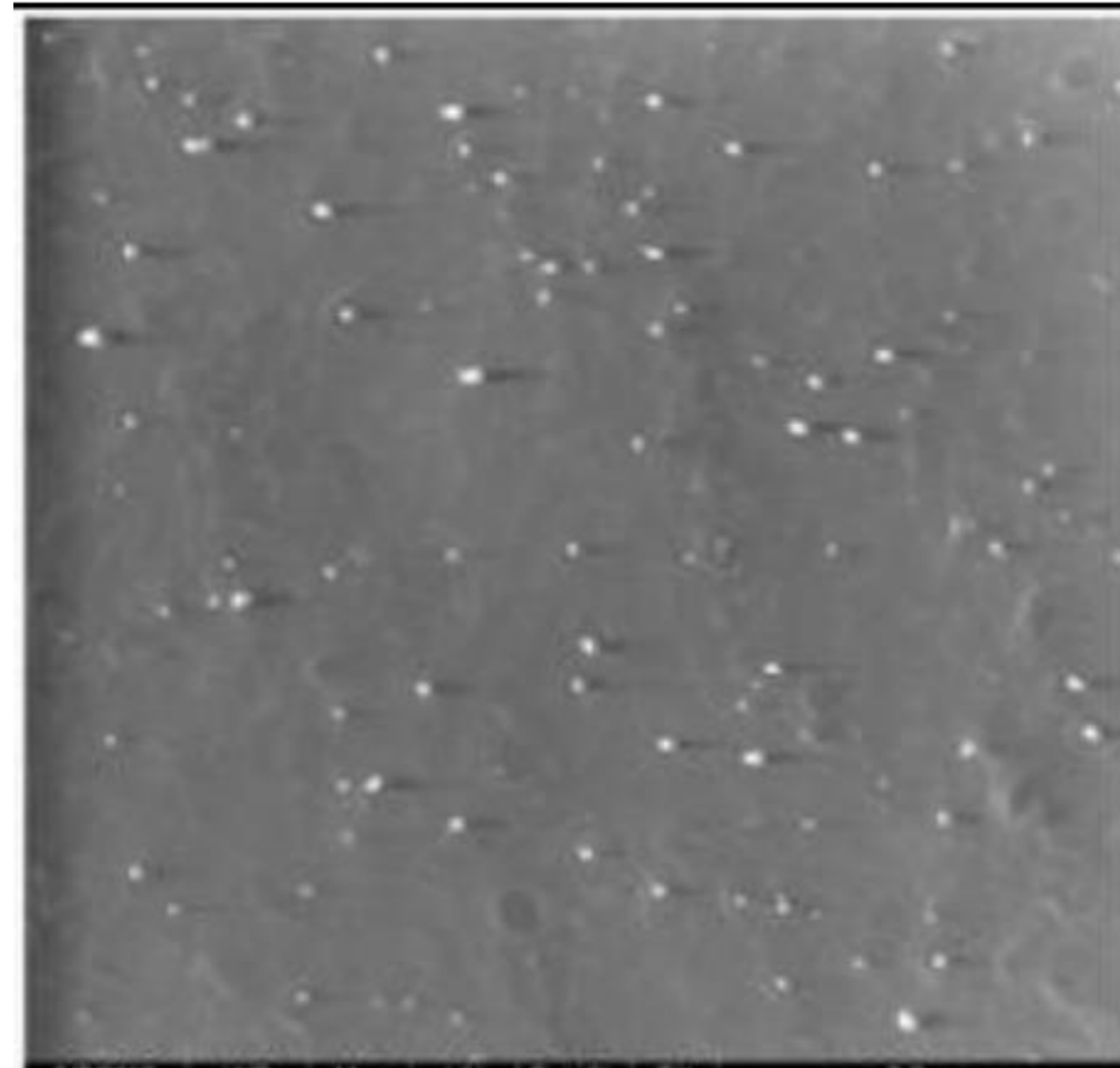


[7]



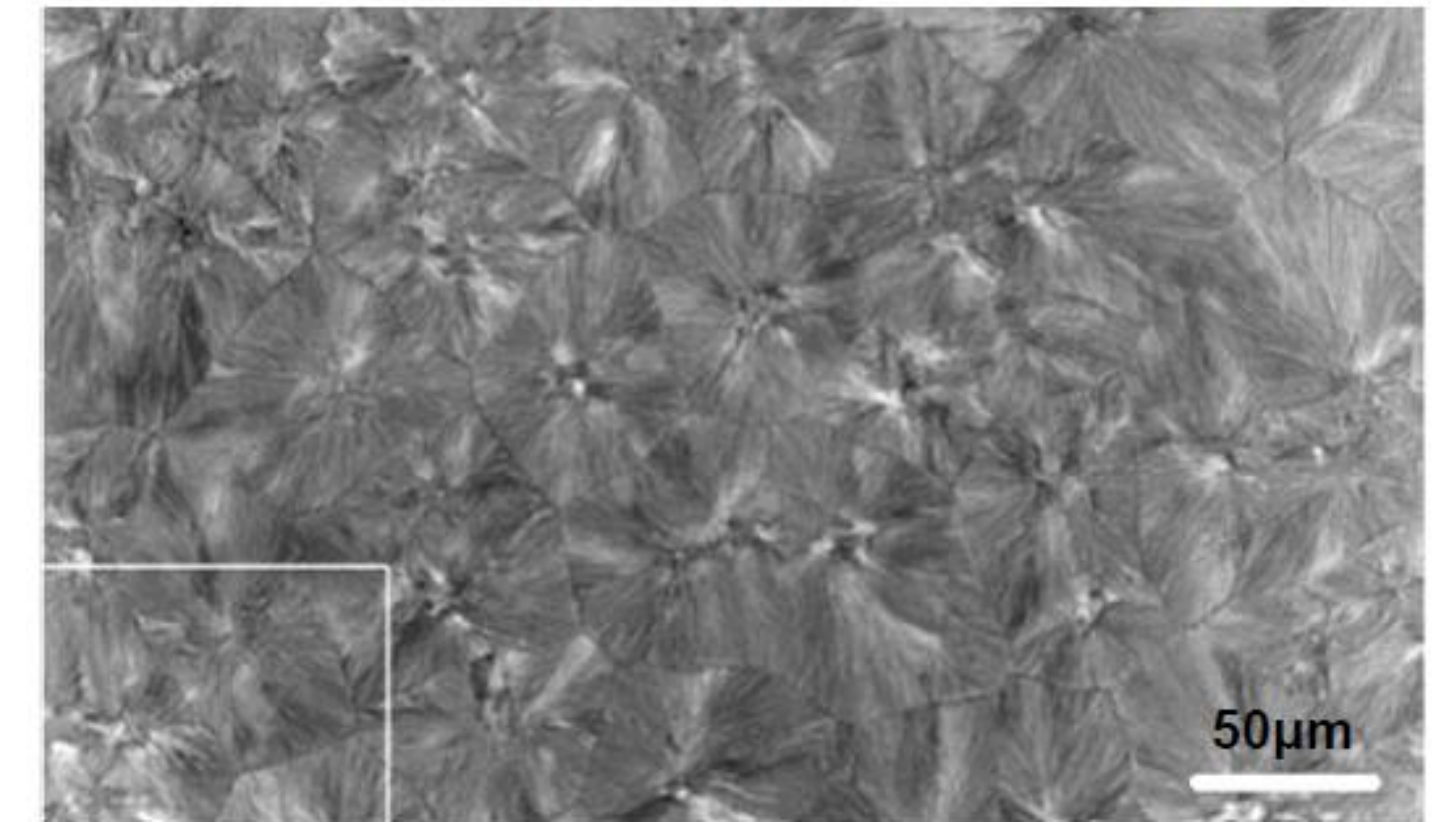
XLPE z napełniaczami

SEM – 13 x 13µm², LS Cable*



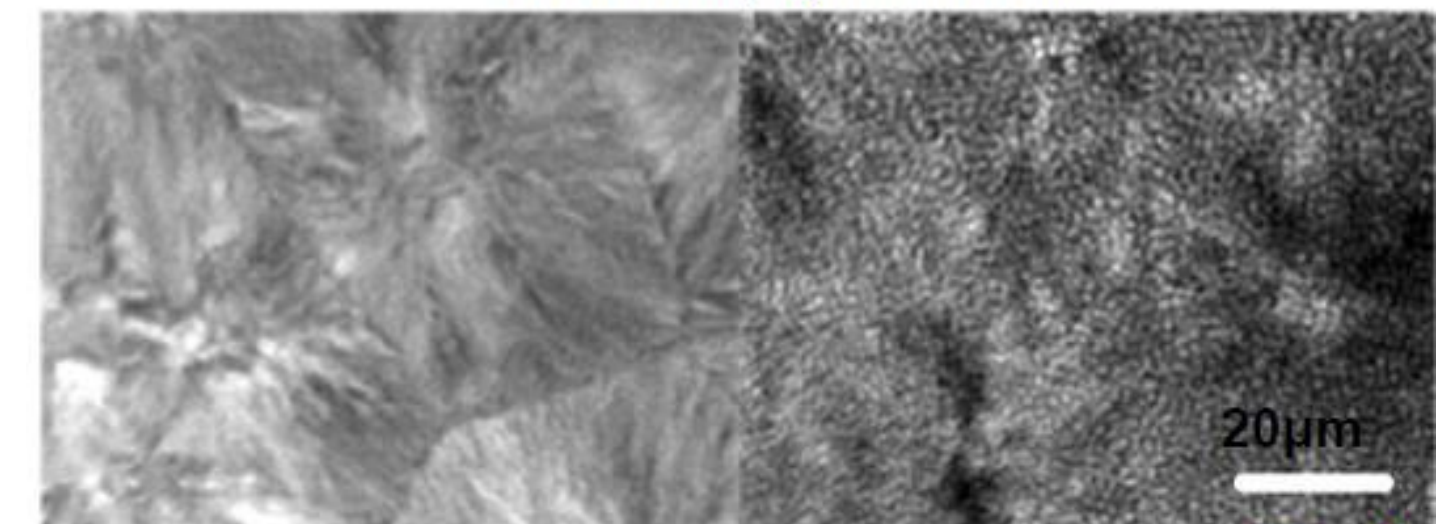
PP

iPP blended with metallocene-catalyzed propylene-ethylene copolymer (9-15% ethylene)



C.D Green et al., IEEE TDEI 22, 639, 2015

Different copolymer amounts



Konserwatyzm = bezpieczeństwo
Rozwój = ekonomia ~ środowisko

KOMERCJALIZM - ogólnodostępność

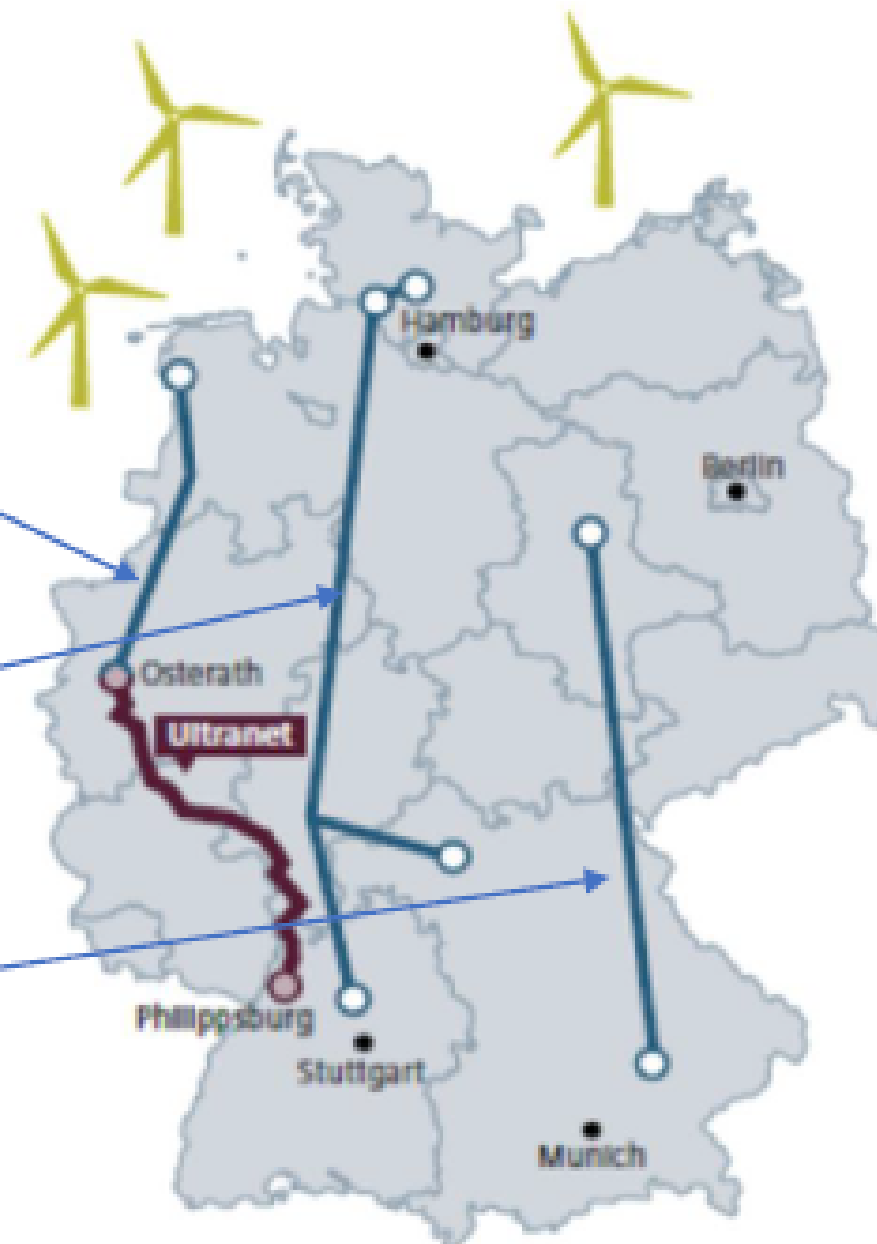
2300km of new HVDC transmission lines, through underground cables at +/-525kV

A-North Project (300km) and Ultranet, 2GW:
Sumitomo: 300km cable route, **XLPE(-nano) insulation**
Prysmian: 300km, **HPTE insulation**, 1GW
Ultranet: overhead HVDC reinforcing HVAC.

Suedlink Project: 1140km 2x2GW
Prysmian 580km cable, **XLPE insulation**, 2GW
NKT: 750km cable, **XLPE insulation**, 2GW

SuedOstlink Project: 580km 2x2GW
NKT: 2x275km cable, **XLPE insulation**, 2GW
Prysmian: 2x275km of **HPTE insulation** 2GW

"NKT and Prysmian in charge of 2x500km-long SuedOstLink (2GW underground cable)



Dziękuję za uwagę

Leszek Resner

Dyrektor ds. Technologii i Rozwoju - Główny Technolog
Zakładu Bydgoszcz

leszek.resner@tfkable.com

TELE-FONIKA Kable S.A.

ul. Hipolita Cegielskiego 1; 32-400 Myślenice

T: (+12) 652 5000

info@tfkable.com