



POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT PODSTAW
ELEKTROTECHNIKI I ELEKTROTECHNOLOGII

**DEGRADACJA GUM SILIKONOWYCH W OBECNOŚCI
ZABRUDZEŃ I WYŁADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH W ASPEKCIE
PRZESKOKU ZABRUDZENIOWEGO.**

Krzysztof Wieczorek

Rozprawa doktorska przedłożona
Radzie Wydziału Elektrycznego
Politechniki Wrocławskiej

Promotor: dr hab. inż. *Jacek Wańkiewicz*

WROCŁAW 2002

Składam serdeczne podziękowania Panu doktorowi habilitowanemu Jackowi Wańkowiczowi za podjęcie trudu kierowania moją pracą oraz cenne rady i wskazówki udzielane w trakcie jej realizacji .

Wyrażam wdzięczność Panu Profesorowi Januszowi Fleszyńskiemu za życzliwość i pomoc w rozwiązywaniu problemów natury organizacyjnej.

Bardzo dziękuję wszystkim Pracownikom Zakładu Wysokich Napięć Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii za stworzenie przychylnej i milej atmosfery współpracy oraz bieżącą pomoc.

Krzysztof Wieczorek

Spis treści.

1. Wstęp.....	1
2. Problematyka badań laboratoryjnych i terenowych.....	4
3. Analiza warunków klimatycznych w Polsce i ich wpływ na pracę izolacji napowietrznej.....	7
3.1. Promieniowanie słoneczne.....	7
3.2. Rozkład temperatury.....	9
3.3. Opady atmosferyczne.....	10
3.4. Wilgotność powietrza.....	11
3.5. Zamglenie.....	11
3.6. Podsumowanie.....	12
4. Główne narażenia środowiskowe i eksploatacyjne. Oddziaływanie głównych narażeń na izolatory kompozytowe i tradycyjne oraz ich odwzorowanie w badaniach laboratoryjnych.....	14
4.1. Główne narażenia środowiskowe i eksploatacyjne.....	14
4.1.1. Zawilgocenie powierzchni izolatora. Opady atmosferyczne.....	15
4.1.2. Promieniowanie ultrafioletowe.....	16
4.1.3. Wpływ obecności zabrudzeń.....	18
4.1.4. Wpływ wyładowania koronowego.....	19
4.1.5. Wpływ wyładowania łukowego.....	20
4.1.6. Rozkład napięcia wzdłuż izolatora.....	21
4.2. Odwzorowanie narażeń środowiskowych i eksploatacyjnych w badaniach laboratoryjnych.....	26
5. Tezy pracy i program badań.....	32
6. Metodyka badania gum silikonowych. Opisy eksperymentów.....	34
6.1. Obiekt badań.....	34
6.2. Opis metody zabrudzania próbek.....	35
6.3. Pomiary katów zwilżania.....	36
6.4. Test starzeniowy metodą koła śladu pełznego lub erozji (Rotating Wheel Deep Test - (RWDT)).....	37
6.5. Test wyładowania koronowego.....	39
6.6. Zmodyfikowany test pochylej próbki.....	41
6.7. Test starzeniowy w komorze klimatycznej.....	43
6.8. Test długotrwałego oddziaływania wody.....	45
7. Wyniki badań.	46

7.1. Analiza fizyko-chemiczna zabrudzeń wykorzystanych w eksperymentach badawczych.....	46
7.1.1. Struktura materiału.....	46
7.1.2. Analiza chemiczna.....	48
7.1.3. Konduktywność zanieczyszczeń naturalnych.....	49
7.1.4. Podsumowanie.....	50
7.2. Badania metodą koła śladu pełznego lub erozji (RWDT).....	51
7.2.1. Wyniki badań materiału HTV.....	51
7.2.2. Wyniki badań pokrycia RTV.....	54
7.2.3. Podsumowanie wyników.....	59
7.3. Wpływ oddziaływania wyładowania koronowego.....	60
7.3.1. Wyniki badań.....	60
7.3.2. Podsumowanie wyników.....	66
7.4. Zmodyfikowany test pochylej próbki.....	66
7.4.1. Wyniki badań.....	66
7.4.2. Podsumowanie wyników.....	78
7.5. Badania starzeniowe w komorze klimatycznej.....	79
7.5.1. Wyniki badań.....	79
7.5.2. Podsumowanie wyników.....	85
7.6. Test długotrwałego oddziaływania wody na właściwości hydrofobowe gum silikonowych.....	85
7.6.1. Wyniki badań.....	85
7.6.2. Podsumowanie wyników.....	91
8. Praktyczne wykorzystanie wyników badań gum silikonowych. Konstrukcja izolatora hybrydowego.....	92
9. Degradacja gumy silikonowej w aspekcie przeskoku zabrudzeniowego.....	95
9.1. Specyfika wyładowania zabrudzeniowego na izolatorze kompozytowym....	95
9.2. Wyniki badań stanu zwilżalności powierzchni izolatorów kompozytowych z eksploatacji.....	98
9.3. Mechanizm przeskoku zabrudzeniowego wzdłuż nierównomiernie zwilżonej powierzchni.....	104
9.4. Podsumowanie.....	109
10. Podsumowanie końcowe.....	111
11. Literatura.....	115

1. Wstęp.

Izolatory kompozytowe, zwłaszcza w osłonach z elastomerów silikonowych stanowią od ponad 30 lat coraz atrakcyjniejszą alternatywę techniczną i cenową w stosunku do tradycyjnych izolatorów porcelanowych i szklanych. Charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami eksploatacyjnymi, a ich stosowanie znacznie upraszcza wykonywanie prac montażowych i prac pod napięciem w sieciach elektroenergetycznych.

Te bardzo dobre właściwości eksploatacyjne izolatorów kompozytowych wynikają z niskiej zwilżalności ich powierzchni co uniemożliwia lub skutecznie ogranicza rozwój prądów upływu w warunkach występowania opadów deszczu, mgły lub mżawki, a w konsekwencji zapobiega występowaniu przeskoków zabrudzeniowych [6,7,18,29].

Niestety na skutek procesów starzeniowych związanych z oddziaływaniem narażeń eksploatacyjnych na izolator, zwilżalność jego powierzchni może okresowo wzrastać [4-6,38]. Nie jest to jednak proces nieodwracalny. Unikatową właściwością gum silikonowych jest bowiem zdolność do regeneracji niskiej zwilżalności co powoduje, że izolator kompozytowy przez wiele lat zachowuje dobre właściwości eksploatacyjne, a występowanie przeskoków zabrudzeniowych i związanych z nimi stanów awaryjnych sieci jest bardzo rzadkie.

Rosnący udział izolatorów kompozytowych w światowym rynku izolatorowym spowodował w ostatnich 15-20 latach gwałtowny rozwój w zakresie produkcji i przerobu elastomerów silikonowych. W efekcie na rynku pojawiło się wiele firm, których katalogi zawierają dane różnego rodzaju gum silikonowych oferowanych w postaci gotowych półproduktów w wielu odmianach, a których właściwości nie sposób ocenić na podstawie tylko opisu katalogowego. Potrzeby w zakresie wiarygodnej oceny właściwości materiałów osłonowych spowodowały, że w okresie ostatnich 20 lat wykorzystywano w tym celu różne metody badawcze opracowane w zasadzie dla materiałów tradycyjnych, których specyfika jest zasadniczo odmienna od współczesnych elastomerów silikonowych. Poszukując uniwersalnego testu, który pozwalałby wiarygodnie i tanio ocenić właściwości materiałów osłonowych wytypowano w tym celu najpierw metodę karuzeli (Merry-go-round Test [19]), a ostatnio metodę mgły solnej [11,27,28]. Takie podejście nie przyniosło zadowalających wyników, a według [34] wykorzystywanie do tego celu metody mgły solnej rodzi więcej wątpliwości niż odpowiedzi dotyczących oceny materiału osłonowego. Wszystkie te trudności skłoniły ostatnio Grupę Roboczą 15.14 Komitetu Studiów nr 15

CIGRE do ponownego rozpoczęcia prac w temacie oceny właściwości materiałów polimerowych stosowanych na osłony izolatorów kompozytowych od sklasyfikowania „istotnych cech” materiałów polimerowych i wstępnego przypisania metod badawczych, które umożliwią ich porównywanie [55]. Wynika stąd dalej, że prace w zakresie badania i oceny właściwości materiałowych elastomerów silikonowych wróciły w dużej mierze do punktu wyjścia i istnieje potrzeba opracowania i doboru grupy metod badawczych pozwalających ocenić specyficzne właściwości materiałów osłonowych. Dotyczy to zwłaszcza oceny zmian zwilżalności materiałów osłonowych, to znaczy utraty niskiej zwilżalności, warunków jej regeneracji oraz zdolności do hydrofobizacji powierzchniowych zanieczyszczeń gdzie wspomniana Grupa Robocza nie wskazała żadnych preferowanych metod badawczych.

Przebieg tych procesów niewątpliwie zależy nie tylko od rodzaju gumy, a przede wszystkim od sposobu jej narażania w eksploatacji lub podczas badań laboratoryjnych. Dlatego izolatory kompozytowe wykonane z takich samych materiałów i o porównywalnej drodze upływu wykazują różny poziom awaryjności w zależności od surowości narażeń środowiskowych w tym zwłaszcza intensywności zawilgocenia [36].

Wydaje się, że interesujące z punktu widzenia użytkownika izolatora kompozytowego byłoby chociaż orientacyjne określenie przebiegu długotrwałego starzenia w miejscu eksploatacji na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych. W takim przypadku z wielu oferowanych przez wytwórców gum silikonowych można by wybrać tę, która będzie najbardziej odporna na niszczący wpływ środowiska w miejscu eksploatacji izolatorów.

Osobnym zagadnieniem jest przeskok zabrudzeniowy na izolatorze kompozytowym i jego związek z wieloletnią degradacją powierzchni materiału osłonowego i zmianami zwilżalności stąd wynikającymi.

Obecnie w literaturze przedmiotu nie ma opisanego żadnego mechanizmu, który pozwalałby przewidywać poziom napięcia, przy którym nastąpi przeskok zabrudzeniowy dla izolatora z zadaniem rozkładem zwilżalności. Co więcej dane literaturowe dotyczące badań laboratoryjnych wskazują, że przy napięciach roboczych sieci elektroenergetycznych przeskoki takie są praktycznie niemożliwe [50,74]. Przeczą temu jednak pojawiające się sporadycznie doniesienia literaturowe wskazujące, że przeskoki zabrudzeniowe występują niekiedy na izolatorach kompozytowych po wieloletniej eksploatacji [106].

Zarysowany tutaj obszar problematyki w zakresie badań elastomerów silikonowych i izolatorów kompozytowych miał zasadniczy wpływ na wybór tematyki i zakresu zrealizowanej rozprawy doktorskiej.

Mając świadomość niedostatku badań dotyczących zagadnień degradacji powierzchni elastomerów silikonowych w tym zwłaszcza zmian ich hydrofobowości wybrano grupę metod badawczych, które zdaniem autora pozwoliły na ocenę właściwości wybranych gum silikonowych i ich porównawczą ocenę.

Kierując się związkiem czasu życia izolatora kompozytowego ze sposobem jego narażania w pracy przeanalizowano warunki klimatyczne występujące w Polsce w celu wyboru głównych narażeń środowiskowych. Przy doborze głównych narażeń zastosowanych w poszczególnych eksperymentach oraz ich intensywności starano się uwzględnić rzeczywiste warunki jakie mogą występować w czasie eksploatacji co miało na celu późniejsze oszacowanie rozkładu zwilżalności na powierzchni izolatora po wieloletniej eksploatacji oraz poznanie przebiegu degradacji gum silikonowych.

Interesującym problemem nie znajdującym jeszcze odniesienia do literatury przedmiotu jest zagadnienie zastosowania dwóch gum silikonowych o określonych właściwościach w jednej konstrukcji izolatora hybrydowego, która pozwala na wykorzystanie efektu synergii unikatowych właściwości zastosowanych w niej materiałów. Badania gum opisane w tej pracy miały w tym zakresie aspekt praktyczny, polegający na uzasadnieniu wyboru konkretnych gum do zastosowania w pierwszej w Polsce konstrukcji izolatora hybrydowego [85,86].

W ostatniej części pracy przedstawiono problem powstawania nierównomiernego rozkładu warstwy zwilżalnej na powierzchni izolatora kompozytowego w aspekcie przeskoku zabrudzeniowego. Wykazano, że możliwe jest wystąpienie przeskoku zabrudzeniowego na izolatorze kompozytowym po wieloletniej eksploatacji przy napięciach roboczych sieci elektroenergetycznej. Ten przeskok zabrudzeniowy można opisać za pomocą zmodyfikowanego mechanizmu Obenaus [85].

2. Problematyka badań laboratoryjnych i terenowych.

Podstawowym celem badań laboratoryjnych i terenowych jest ocena przydatności materiałów i konstrukcji izolatorowych do eksploatacji w warunkach napowietrznych. O ile badania terenowe umożliwiają poznanie rzeczywistych narażeń, którym podlegają izolatory elektroenergetyczne to badania laboratoryjne stanowią próbę takiego odwzorowania tych narażeń aby z jednej strony skrócić czas potrzebny do oceny izolatora w próbach terenowych, a z drugiej nie zmienić mechanizmu oddziaływania narażeń w warunkach laboratoryjnych.

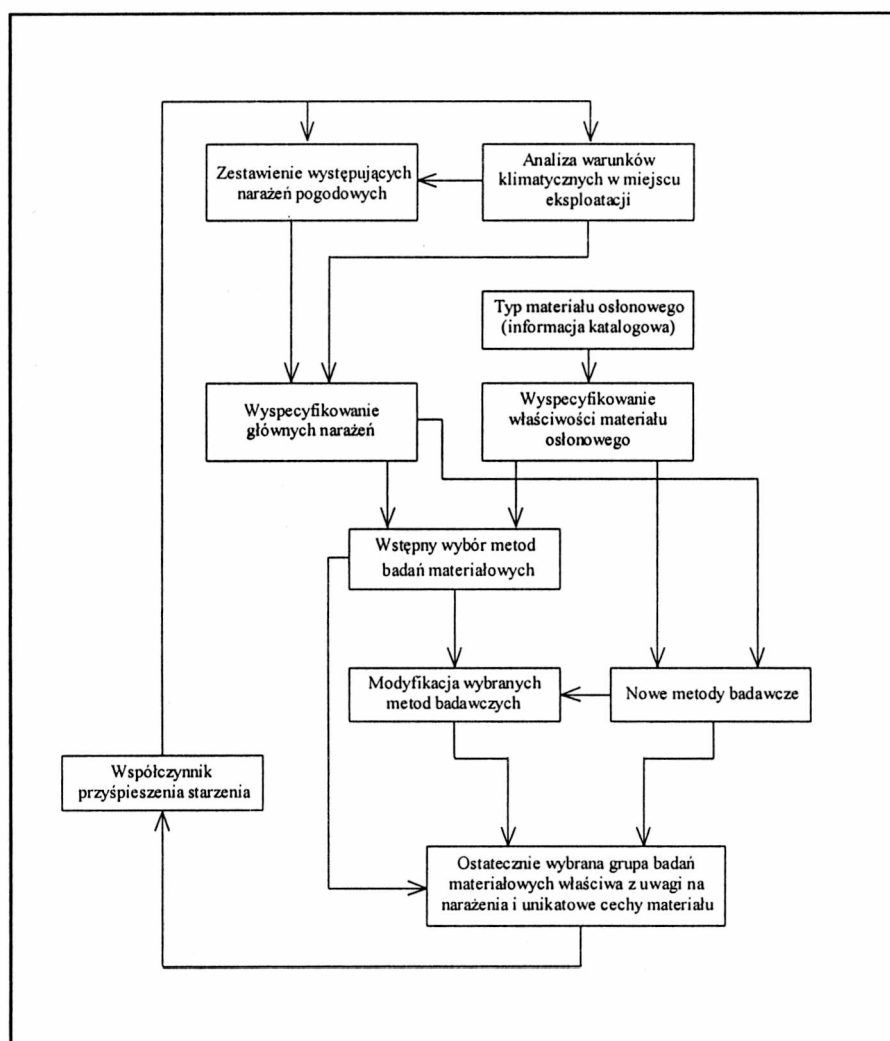
Takie zagrożenie występuje zwłaszcza podczas badań laboratoryjnych nowoczesnych materiałów osłonowych współczesnych izolatorów kompozytowych, które w odróżnieniu od materiałów tradycyjnych zwalczają narażenia eksploatacyjne w sposób aktywny. Należy przez to rozumieć przede wszystkim zdolność do regeneracji niskiej zwilżalności powierzchni materiału osłonowego po narażeniach takich jak cząstkowe wyładowania łukowe związane z tworzeniem suchych stref, po wyładowaniach iskrowych, ulotowych bądź oddziaływaniu wody, rozcieńczonych kwasów i zasad oraz różnego rodzaju zanieczyszczeń.

Problem ten nie występuje w przypadku materiałów tradycyjnych takich jak porcelana czy szkło, które nie są podatne na oddziaływanie wymienionych narażeń i w stosunku do materiałów osłonowych izolatorów kompozytowych zachowują się pasywnie. Jednocześnie współcześnie wykorzystywane metody badań laboratoryjnych zostały opracowane właśnie do oceny materiałów tradycyjnych, a ich wykorzystywanie w praktycznie niezmienionej postaci do oceny przydatności eksploatacyjnej materiałów kompozytowych jest często nieporozumieniem. Wątpliwości budzi np. test mgły solnej opisany w normie IEC1109 [41], w którym dyskusyjna pozostaje klasyfikacja testu czy jest to test starzeniowy czy zabrudzeniowy. Podobnie opisany w normie IEC587 [42] i ASTM2303 [15] test pochylej próbki nie nadaje się w znormalizowanej postaci do bezpośredniego zastosowania podczas badania na przykład gum silikonowych ponieważ krople elektrolitu nie zwilżają powierzchni gum silikonowych [26,30]. Nasuwa się pytanie o sens prowadzenia takich badań skoro do ich przeprowadzenia konieczne jest istotne pogorszenie właściwości materiału jeszcze przed badaniem przez zwiększenie jego zwilżalności w sposób sztuczny na przykład przez potarcie papierem ściernym [21].

Dodatkowym utrudnieniem – niezależnie od problemu badań unikatowych właściwości materiałów osłonowych – jest kompleksowość oddziaływania narażeń na izolatory

eksploatowane w warunkach terenowych, które należy odwzorować w warunkach laboratoryjnych. Stosowane w tym celu testy wieloparametryczne (na przykład test opisany w załączniku C normy IEC 1109 [41]) są skomplikowane i kosztowne - ponieważ wymagają korzystania z zaawansowanej aparatury badawczej - a w związku z tym są rzadko stosowane. Z tego względu – jak już zaznaczono wcześniej – dąży się obecnie do wyspecyfikowania najpierw głównych właściwości materiałów osłonowych, a następnie do przypisania im grupy prostych testów, w wyniku zastosowania których te podstawowe właściwości mogą być zweryfikowane.

Wydaje się, że elastyczność tego podejścia uwzględnia różnorodność oferowanych dzisiaj na rynku materiałów osłonowych i umożliwia ich ocenę w oparciu o starannie wyselekcjonowaną grupę badań laboratoryjnych uwzględniających zarówno informacje o materiale podane w katalogu jak i potrzeby klienta wynikające z warunków eksploatacji izolatorów.



Rys.2.1. Schemat wyboru laboratoryjnych metod badawczych materiałów osłonowych.

Schemat postępowania podczas wyboru laboratoryjnych metod badania materiałów osłonowych przyjęty w tej pracy przedstawiono na rysunku 2.1.

Jak wynika z tego schematu starano się najpierw wyspecyfikować główne narażenia związane z oddziaływaniem klimatu i środowiska w miejscu eksploatacji izolatorów. Następnie w oparciu o tę analizę i informacje katalogowa podawaną przez producenta materiału osłonowego wybrano grupę metod badań materiałowych już istniejących (np. test koła śladu pełznego i erozji), które niekiedy poddano zasadniczej modyfikacji (np. test pochyłej próbki) bądź zaproponowano nowe metody badawcze (np. test wyładowania koronowego w obecności napływającej wody i zabrudzeń).

Narażenia w testach starano się dobierać w oparciu o dokonaną analizę narażeń i wyniki pomiarów stanu zwilżalności izolatorów kompozytowych po wieloletniej eksploatacji. Miało to na celu szacunkowe określenie współczynnika przyspieszenia starzenia w próbach laboratoryjnych i weryfikację wybranych metod badawczych.

3. Analiza warunków klimatycznych w Polsce i ich wpływ na pracę izolacji napowietrznej.

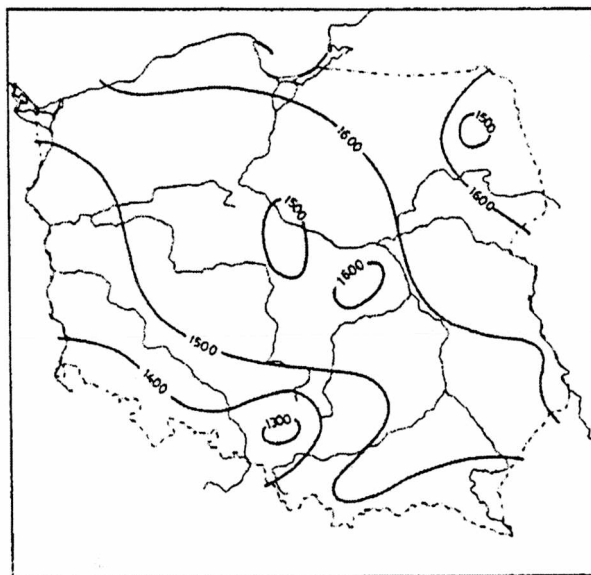
Głównymi czynnikami, które mają bezpośredni wpływ na długotrwałą wytrzymałość elektryczną napowietrznej izolacji wysokonapięciowej są narażenia pogodowe i środowiskowe. Opady deszczu, mgła, intensywne promieniowanie słoneczne, zmiany temperatury czy cząstki pyłów niesione wiatrem powodują stopniową utratę właściwości elektroizolacyjnych dielektryków w wyniku procesów określonych mianem starzenia. Analiza warunków meteorologicznych umożliwia przybliżone oszacowanie skali narażeń pogodowych i ich odniesienie do narażeń, jakim są poddawane materiały osłonowe izolatorów kompozytowych w warunkach laboratoryjnych.

3.1. Promieniowanie słoneczne

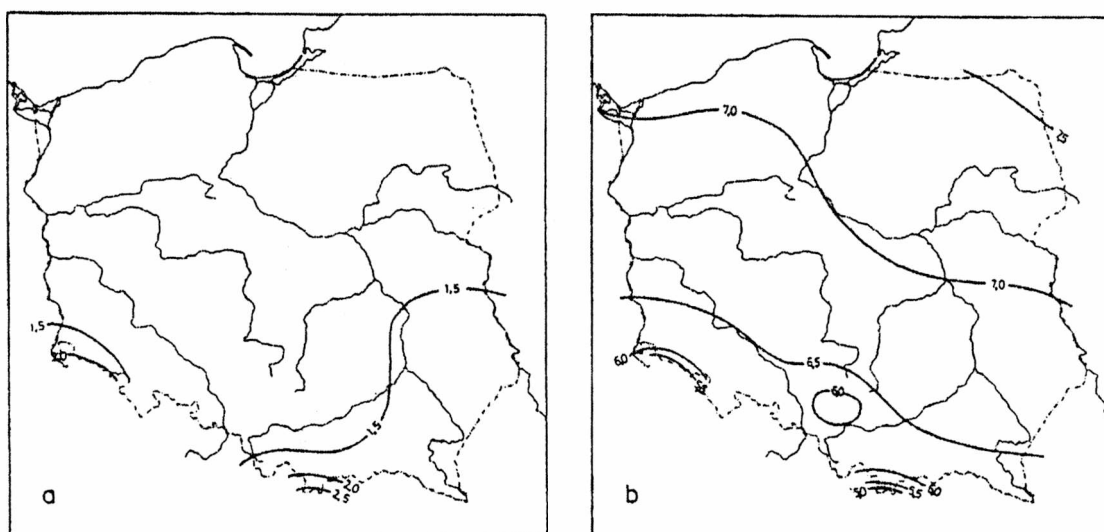
Promieniowanie słoneczne uważane jest za główne źródło energii procesów zachodzących w atmosferze i na powierzchni Ziemi, do której dociera w postaci promieniowania krótkofalowego obejmującego przedział długości fal od około 0,3 do około 0,4 μm . Usłonecznienie określone jest jako czas bezpośredniego dopływu promieniowania słonecznego do Ziemi. Wielkość ta zależy od długości dnia i wielkości zachmurzenia ogólnego nieba. W badaniach usłonecznienia korzysta się z dwóch następujących wskaźników:

- usłonecznienia rzeczywistego określającego liczbę godzin ze Słońcem w ciągu doby, miesiąca lub roku, a więc czasu, w którym promieniowanie słoneczne dociera bezpośrednio do podłoża w przedziale widzialnej części widma;
- usłonecznienia względnego, które jest stosunkiem liczby godzin usłonecznienia rzeczywistego do maksymalnie możliwej liczby godzin, liczonej od wschodu do zachodu Słońca. Usłonecznienie względne eliminuje wpływ zmiennej długości dnia w cyklu rocznym oraz ułatwia porównanie wielkości usłonecznienia w poszczególnych okresach roku.

Średnia roczna liczba godzin usłonecznienia rzeczywistego na obszarze kraju waha się od około 1290 (Śląsk) do ponad 1600 godzin (wybrzeże) (rys. 3.1.1) co w przeliczeniu na jedną dobę wynosi od około 3,5 do ponad 4,4 godziny. Najniższa średnia dzienna wartość usłonecznienia rzeczywistego przypada w miesiącu grudniu i zwykle nie przekracza 1 godziny. Natomiast w czerwcu notowane są wartości maksymalne przekraczające 8 godzin w obszarach o największym usłonecznieniu.



Rys. 3.1.1. Średnie roczne usłonecznienie rzeczywiste.
(M. Kuczmarski, 1994) [103]



Rys. 3.1.2. Średnie dzienne usłonecznienie obliczone w godzinach;
a – styczeń, b – lipiec. [103]

Na rysunku 3.1.2 przedstawiono rozkład średniego dziennego usłonecznienia wyrażonego w godzinach, które oscyluje od około 1,5 do 2,5 godziny w miesiącu styczniu do około 5,5 – 7,5 w miesiącu lipcu. Natomiast średnia wartość usłonecznienia względnego w okresie roku waha się od około 27 do 33%, przy czym w skali miesięcznej najwyższe jest w czerwcu – nie spada wówczas poniżej 60% a najniższe w styczniu od około 14 % na terenach nizinnych do 32% w górach. Opisane wielkości średniego usłonecznienia znajdują odzwierciedlenie w średnich dobowych sumach promieniowania całkowitego, które podobnie jak usłonecznienie są najniższe w miesiącach zimowych – nie przekraczają wówczas 2 MJ/m^2 , a najwyższe w letnich (zwłaszcza w lipcu) maksymalnie do 19 MJ/m^2 .

Średnią całoroczną dobową sumę promieniowania całkowitego można więc szacunkowo przyjąć na poziomie $4\text{--}5 \text{ MJ m}^2$. Słońce jako główne źródło ciepła oraz promieniowania ultrafioletowego stanowi istotny czynnik wpływający na zmiany stanu zwilżalności powierzchni izolatorów kompozytowych. Czas rzeczywistego oddziaływania promieniowania słonecznego określany jest przez ilość godzin usłonecznienia rzeczywistego. Jest to także czas degradującego oddziaływania promieniowania ultrafioletowego (UV), któremu towarzyszy emisja ciepła.

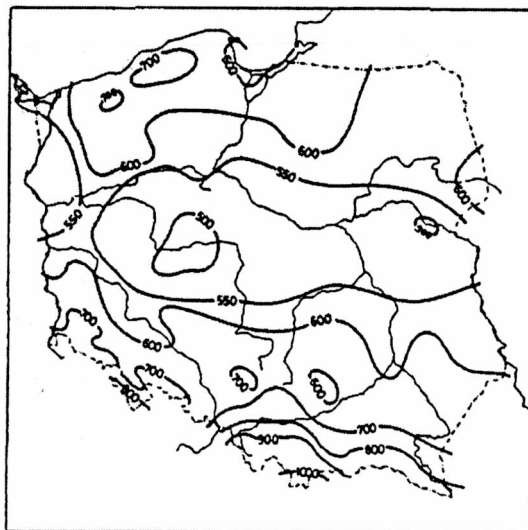
Temperatura natomiast jest ważnym czynnikiem wpływającym na dynamikę regeneracji właściwości hydrofobowych. Szybkość tego procesu jest tym większa im wyższa jest temperatura otoczenia [12]. Ponieważ średnie roczne usłonecznienie rzeczywiste w warunkach krajowych wynosi około 1450 godzin, to można przyjąć, że średnio na każdą dobę w roku przypada około 4 słonecznych godzin.

3.2. Rozkład temperatury

Wielkość średniej rocznej temperatury powietrza uważana jest za kompleksowy wskaźnik opisujący stosunki termiczne danego obszaru. W warunkach polskich wskaźnik ten waha się od około 6 do 8°C . W najchłodniejszych latach średnia temperatura roczna może być niższa o około $1\text{--}2^\circ\text{C}$, w porównaniu ze średnią wieloletnią. W odniesieniu miesięcznym najwyższe średnie temperatury pory letniej oscylują na poziomie $16\text{--}18^\circ\text{C}$. Maksymalne dobowe temperatury powietrza pory letniej przekraczają 30°C , a maksymalny odnotowany rekord to prawie 40°C . Natomiast najniższe średnie miesięczne temperatury przypadają w miesiącu styczniu i wynoszą od -1 do prawie -6°C . Regeneracja hydrofobowości izolatorów kompozytowych jest procesem uzależnionym od temperatury. W zakresie temperatury około 0°C i poniżej proces ten jest niezauważalny, a jego dynamika wzrasta wraz ze wzrostem temperatury [12]. Tak więc, temperatury sprzyjające odzyskowi hydrofobowości przypadają na porę wiosenno-letnią i można przyjąć, że okres ten trwa od miesiąca maja do września (około 4-5 miesięcy w roku).

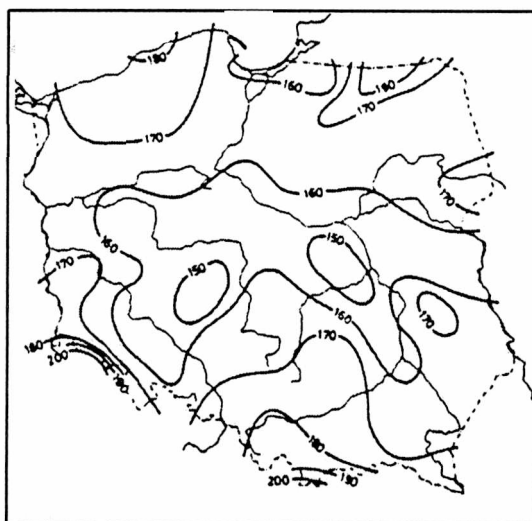
3.3. Opady atmosferyczne

Opady atmosferyczne charakteryzują się w warunkach krajowych dużą zmiennością i związane są z częstym przemieszczaniem się frontów meteorologicznych. Parametrem charakteryzującą ilość opadów jest średnia roczna suma opadów, która na przeważającym obszarze Polski wynosi od 500 do 700 mm (rys. 3.3.1).



Rys. 3.3.1. Średnie roczne sumy opadów atmosferycznych.
Dane za lata 1951-1980 w mm (M. Sadowski, 1994) [103]

Na większości obszaru Polski średnia roczna liczba dni z opadem, który przekracza bądź jest równy poziomowi 10 mm nie przekracza 15. Najwięcej dni z takimi opadami odnotowuje się w rejonach górskich i średnio jest ich od 34 do około 50 w roku. Natomiast średnia roczna liczba dni z opadem zawiera się od 150 na nizinach do 200 dni w rejonach górskich (rys.3.3.2).



Rys. 2.3.2. Średnia roczna liczba dni z opadem.
Dane za lata 1951-1980 (J. Tamulewicz, 1995) [103]

Opady deszczu – szczególnie intensywne i długotrwałe – są jedną z głównych przyczyn wzrostu powierzchniowej zwilżalności izolatorów kompozytowych. Długotrwały opad może zmyć zhydrofobizowaną warstwę zabrudzeń „odkrywając” czystą hydrofilną powierzchnię. Stan taki może prowadzić do rozwoju prądu upływu i dalszej termicznej degradacji materiału. Obecność kropeł wody na powierzchni izolatora wpływa na deformację pola elektrycznego i może powodować jego lokalne wzmocnienie, co z kolei może zainicjować wystąpienie wyładowania koronowego. Zjawisko to może wystąpić również w czasie intensywnych mgieł.

3.4. Wilgotność powietrza

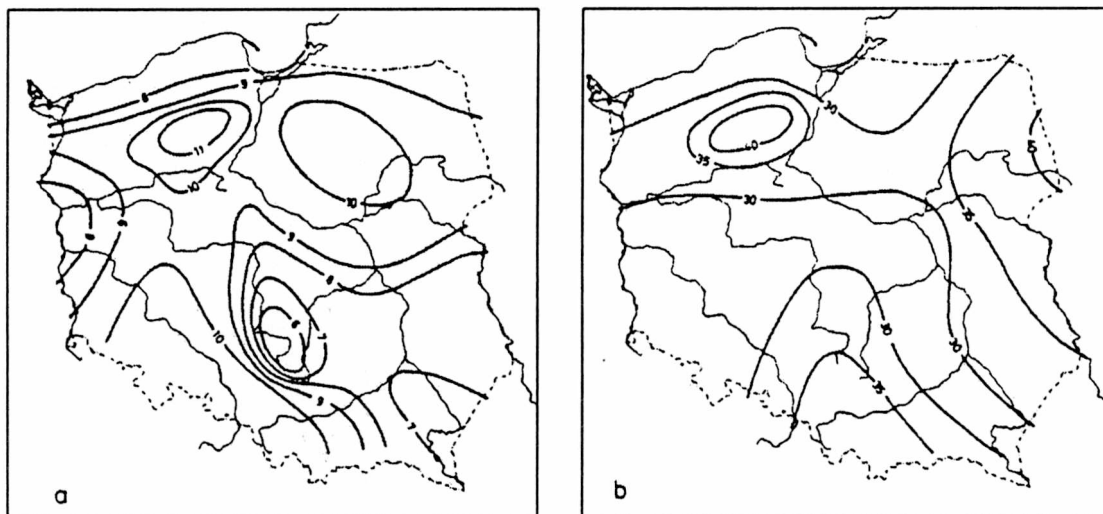
Wilgotność względna jest ważnym wskaźnikiem określającym stopień nasycenia powietrza parą wodną i oznacza ile pary wodnej znajduje się w powietrzu w stosunku do powietrza nasyconego parą wodną. Średnie roczne wartości wilgotności względnej wynoszą 77-80%. Wielkość ta jest tylko nieco wyższa w pasie nizin nadmorskich i wynosi około 83%. Największa wilgotność względna powietrza występuje w porze jesienno-zimowej tzn. od listopada do lutego i osiąga wartość 80-90%. Najmniejszą wilgotnością względną odznaczają się miesiące letnie, a minimum roczne notuje się na przeważającej części kraju w czerwcu i wynosi ono około 67-70%. Duże spadki wilgotności w Karpatach, które osiągające poziom nawet 30-40% związane są z występowaniem wiatru halnego. Zjawisko to jest wynikiem tzw. efektu fenu. W warunkach krajowych zmiany wilgotności powietrza nie mają bezpośredniego wpływu na stan zwilżalności izolatorów kompozytowych. Jednak przy wysokiej wilgotności powietrza gwałtowny spadek temperatury może spowodować wykraplanie się pary wodnej na powierzchni izolatorów. Zjawisko to nasila się szczególnie w okresie wiosennym i jesiennym powodując wzrost awaryjności izolatorów tradycyjnych, a także wzrost zagrożenia dla izolatorów kompozytowych.

3.5. Zamglenie

Pod pojęciem mgły rozumie się zawiesinę bardzo małych kropelek wody w powietrzu, zmniejszającą widzialność w kierunku poziomym. Mgła stanowi zazwyczaj białą zasłonę przysłaniającą krajobraz. Średnia roczna liczba dni z mgłą wykazuje na obszarze Polski znaczne zróżnicowanie i waha się od 20 do nawet 58 dni (dane statystyczne za lata 1956-1970) [103]. Najliczniejsze przypadki mgieł (poza obszarami góorskimi) odnotowuje się

jesienią, szczególnie w październiku na pojezierzach Pomorskim i Mazurskim (ponad 10) (rys. 3.5.1). Poniżej 7 przypadków mgły w tym miesiącu występuje w południowo-wschodniej części kraju. Czerwiec jest miesiącem o najrzadszym występowaniu mgły i nie przekracza 3 dni.

Suma godzin z mgłą w ciągu roku, poza terenami góorskimi wynosi średnio kilkaset. Na Nizinie Wielkopolskiej mgły zalegają średnio przez około 300 godzin, w okolicach Bydgoszczy przez 320 godzin natomiast w rejonie Wielunia mniej niż przez 110 godzin.



Rys. 3.5.1. Średnia liczba mgieł w październiku - a;
Procent mgieł trwających powyżej 6 godzin - b.
Dane za lata 1961-1970 (H. Piwkowski, 1994) [103]

W przypadku izolatorów kompozytowych największym zagrożeniem są gęste mgły o bardzo małej przejrzystości. Duża ilość mikroskopijnych kropelek pokrywając całą ich powierzchnię może łatwo doprowadzić do rozwoju prądu upływu i w konsekwencji spowodować przeskok po powierzchni izolatora. Średnio w warunkach krajowych ciągu roku na każdą dobę przypada około 40 minut mgły. Można przyjąć, że występują wówczas ekstremalne warunki pracy izolatora, ponieważ ujawnia się wtedy nierównomierny rozkład zwilżalności na jego powierzchni.

3.6. Podsumowanie

Celem przedstawionej w niniejszym rozdziale analizy warunków pogodowych jakie występują w warunkach krajowych jest umożliwienie dokonania właściwego doboru intensywności narażeń przy opracowaniu programu laboratoryjnych badań starzeniowych (rozdziały 6 i 7).

Jak już zaznaczono w rozdziale 3.1 temperatura jest ważnym czynnikiem wpływającym na dynamikę regeneracji właściwości hydrofobowych izolatorów kompozytowych. Proces regeneracji występuje przy temperaturach dodatnich i jest szczególnie zadawalający w zakresie powyżej 20°C co odpowiada temperaturom pory wiosenno-letniej, która przypada na okres od maja do września. Przyjęto również, że średnie roczne dobowe usłonecznienie rzeczywiste wynosi około 4 godzin o średnim promieniowaniu 4-5 MJ/m². Liczba dni z opadami atmosferycznymi, które przyczyniają się do wzrostu zwilżalności powierzchni izolatorów kompozytowych wynosi około 150 co stanowi około 47% wszystkich dni w roku. Podobnie średni dobowy czas występowania mgieł w spektrum całorocznym wynosi 40 minut na każdą dobę roku.

Natomiast średnia wilgotność względna wynosi 77-80%. Gwałtowne spadki temperatur jakie szczególnie często występują w okresie wiosny i jesieni - kiedy temperatura nocy jest znacznie niższa od temperatury dnia - powodują wykraplanie się pary wodnej (rosy). Niewielkie kropelki pokrywające powierzchnie izolatorów kompozytowych – podobnie jak opady atmosferyczne - przyczyniają się do stopniowej utraty hydrofobowości.

Można więc przyjąć, że warunki pogodowe, które sprzyjają regeneracji właściwości hydrofobowych występują w przybliżeniu od połowy maja do połowy września (tj. około 4 miesięcy).

Na podstawie powyższych rozważań można przyjąć, że:

- około 20% roku to czas słoneczny czyli czas oddziaływania promieniowania UV na powierzchnie izolatorów;
- około 35% roku to czas, w którym temperatura powietrza jest nie niższa niż 18-20°C co sprzyja regeneracji hydrofobowości (stanowi to czas około 4-5 miesięcy w roku);
- około 49% dni w roku to dni z opadami atmosferycznymi i zamgleniami (średnio w roku takich dni jest około 150) czyli czas oddziaływania wilgoci na powierzchnie izolatorów.

Wielkości te stanowiły odniesienie do wyboru intensywności narażeń dobranych w poszczególnych eksperymentach.

4. Główne narażenia środowiskowe i eksploatacyjne. Oddziaływanie głównych narażeń na izolatory kompozytowe i tradycyjne oraz ich odwzorowanie w badaniach laboratoryjnych.

4.1. Główne narażenia środowiskowe i eksploatacyjne.

Izolatory elektroenergetyczne są poddawane oddziaływaniu narażeń środowiskowych i eksploatacyjnych, z których jako główne uznano - w oparciu o analizę warunków klimatycznych - oddziaływanie wilgoci, opadów deszczu, zmian temperatury, zabrudzeń i wysokiego napięcia.

Izolatory klasyczne (ceramika, szkło) i kompozytowe (elastomery silikonowe) charakteryzują się odmiennym mechanizmem zwalczania narażeń eksploatacyjnych. I tak w przypadku izolatorów tradycyjnych materiał jest elementem pasywnym natomiast zasadnicze znaczenie ma kształt i długość drogi upływu izolatora. W przypadku osłon izolatorów kompozytowych i hydrofobowych pokryć izolatorowych zasadnicze znaczenie ma aktywność materiału izolatora (pokrycia) w zwalczaniu narażeń, a mniejsze kształt izolatora (uwarunkowany często technologią produkcji). Kwestia długości drogi upływu izolatorów kompozytowych z punktu widzenia ich odporności eksploatacyjnej jest zagadnieniem kontrowersyjnym, obecnie w fazie intensywnych badań - zwłaszcza terenowych [61]. W warunkach przeciętnych, a nawet silnych zabrudzeń typu przemysłowego i umiarkowanej wilgotności skrócenie drogi upływu izolatorów w osłonach z elastomeru silikonowego, w stosunku do drogi upływu wymaganej dla izolatorów tradycyjnych praktycznie nie wpływa na skrócenie ich czasu życia. Natomiast skrócenie drogi upływu tych izolatorów w warunkach eksploatacyjnych charakteryzujących się występowaniem intensywnego zabrudzenia i zawilgocenia (tereny przyległe do linii brzegowej mórz) w zasadniczy sposób zwiększa awaryjność izolatorów kompozytowych [59]. Należy jeszcze zaznaczyć, że wymienione tutaj narażenia z różną intensywnością oddziałują na elementy powierzchni izolatora kompozytowego - co w przypadku izolatorów tradycyjnych nie miało znaczenia eksploatacyjnego. I tak wyładowanie koronowe stanowi narażenie powierzchni osłony z gumy silikonowej izolatora w otoczeniu okucia przy przewodzie wysokonapięciowym natomiast na pozostałej części osłony jest do pominięcia [77]. Podobnie promieniowanie UV, dla izolatora kompozytowego znajdującego się w łańcuchu przelotowym stanowi główne narażenie górnych powierzchni kloszy i odcinka pnia przy okuciu od strony słupa.

Nieco inny charakter ma oddziaływanie zawilgocenia i zabrudzeń. Z uwagi na różne formy występowania zawilgocenia (opady deszczu, mżawki, kondensacja itp.) i zabrudzeń (typ

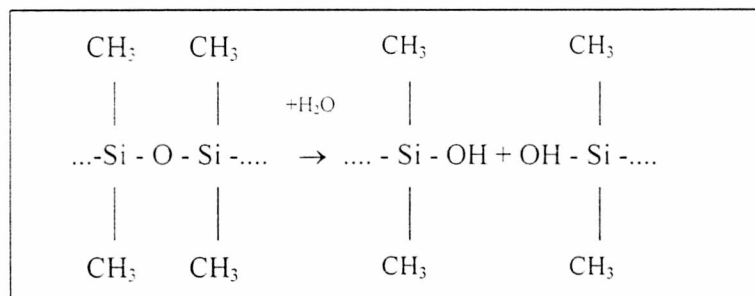
zabrudzenia, średnica ziaren, źródło zabrudzenia itd.) należy przyjąć, że oddziaływanie tych czynników może dotyczyć elementu powierzchni osłony izolatora kompozytowego jak i jego całości.

Mając na uwadze aktywną rolę materiału osłonowego w zwalczaniu zewnętrznych narażeń uznano za celowe przeanalizowanie ich degradującego oddziaływania zwłaszcza na zmiany zwilżalności. W wyniku przeprowadzonej analizy warunków klimatycznych ustalono dominujące narażenia dla wybranych części izolatora kompozytowego i zaproponowano laboratoryjne testy starzeniowe, które mogą je odwzorować.

4.1.1. Zawilgocenie powierzchni izolatora. Opady atmosferyczne.

Woda może pojawić się na powierzchni izolatora jako kondensat, efekt osadzania się mżawki lub w postaci warstwy na powierzchniach bezpośrednio narażonych na oddziaływanie opadów oraz topniejącego śniegu.

W wyniku długotrwałego oddziaływania wody na powierzchnie izolatorów kompozytowych w materiale może następować rotacja łańcuchów chemicznych, których grupy metylowe odsuwają się od powierzchni gumy w kierunku jej wnętrza [52.72], a także przechodzenie lekkich frakcji niskomolekularnych z powierzchni gumy do wody [2]. Oba te zjawiska fizyczne powodują szybką utratę właściwości hydrofobowych powierzchni gumy silikonowej, których w przypadku niektórych elastomerów silikonowych nie udaje się przywrócić. Pod wpływem wody następuje rozrywanie wiązań tlenowo-krzemowych, w miejsce których przyłączane są grupy OH (rys. 4.1.1) [39]. Rozerwanie głównego łańcucha i przyłączenie grup OH powoduje wzrost zwilżalności powierzchni. Dodatkowo, obecność pojedynczych kropeł wody na powierzchni izolatora może deformować pole elektryczne powodując jego lokalne wzmocnienie, a tym samym stanowić źródło wyładowania koronowego lub indukowania łuków cząstkowych [49].



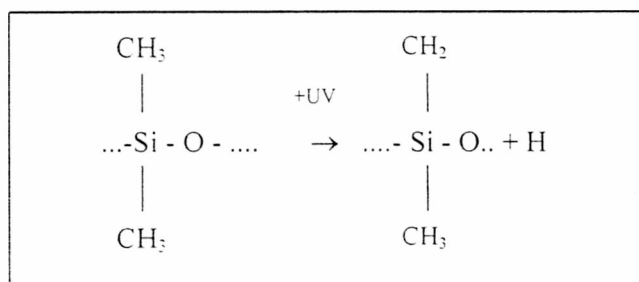
Rys. 4.1.1. Reakcja oddziaływania wody na elastomer silikonowy [39].

Intensywna degradacja spowodowana oddziaływaniem wody jest przyczyną utrudnionej regeneracji w temperaturze otoczenia szczególnie nie zabrudzonych powierzchni izolatorów kompozytowych. [91]. W skrajnych przypadkach regeneracja może okazać się niemożliwa.

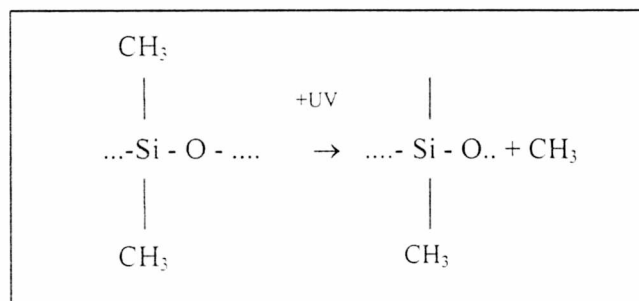
W warunkach eksploatacyjnych opady atmosferyczne szczególnie intensywnie narażają powierzchnie górnego klosza izolatora oraz krawędzie pozostałych kloszy. W przypadku izolatorów odciągowych pracujących w układzie poziomym narażana jest cała powierzchnia.

4.1.2. Promieniowanie ultrafioletowe.

W warunkach naturalnych źródłem promieniowania ultrafioletowego (UV) jest promieniowanie słoneczne. Pod wpływem jego oddziaływania na powierzchnie elastomeru silikonowego następuje dekompozycja grup metylowych tworząc wolne rodniki (rys. 4.1.2 i 4.1.3).

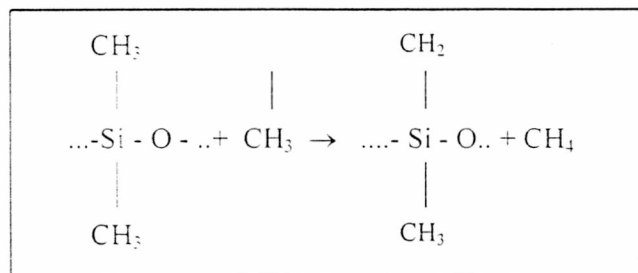


Rys. 4.1.2 Dekompozycja grup metylowych – tworzenie wolnych rodników H [39].

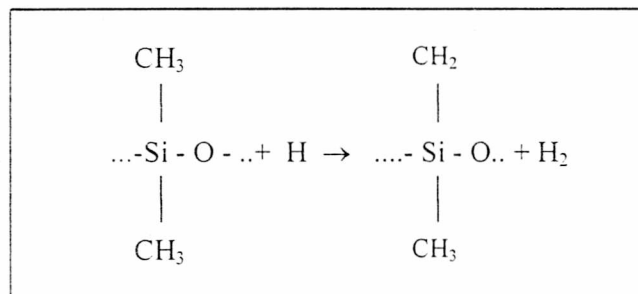


Rys. 4.1.3 Dekompozycja grup metylowych – tworzenie wolnych rodników CH₃ [39].

Rodniki CH₃ przyłączają z łańcucha polimerowego wodór tworząc grupę CH₄ (rys. 4.1.4). Rodniki wodoru {H} są bardzo niestabilne, dlatego przekształcają się w H₂ przyłączając brakujący wodór z łańcucha polimerowego tworząc tym samym grupy -Si-CH₂ (rys. 4.1.5) [39].



Rys. 4.1.4 Przyłączanie przez wolne rodniki $\{\text{CH}_3\}$ wodoru z łańcucha polimerowego [39].



Rys. 4.1.5 Przyłączanie przez wolne niestabilne rodniki $\{\text{H}\}$ wodoru z łańcucha polimerowego –tworzenie grup Si-CH_2 [39].

Taki proces dekompozycji łańcucha polimerowego powoduje pogorszenie się właściwości hydrofobowych elastomerów silikonowych. Tak, więc promieniowanie UV emitowane przez Słońce nie powoduje rozrywania wiązań łańcuch głównego Si-O, lecz tylko wiązań C-H i Si-C. Typowa średnia energia wiązania Si-O w przypadku elastomeru silikonowego wynosi około 450 kJ/mol, gdy tymczasem obliczono, że energia promieniowania UV o długości 300nm umożliwia rozrywanie wiązań o energii wynoszącej około 400 kJ/mol [79]. Ilość promieniowania UV docierającego do powierzchni izolatora kompozytowego może być ograniczona przez obecność zabrudzeń i maleć wraz ze wzrostem współczynnika ESDD. Istotny jest przy tym fakt, że promieniowanie o krótszej długości fali bardziej degradowe materiał, a w obecności zabrudzenia jest przez nie absorbowane [35]. O ile obecność powierzchniowych zabrudzeń może ograniczać degradowe działanie ultrafioletu to w przypadku obecności kropeł wody może wystąpić efekt lokalnego wzmocnienia tego promieniowania. W celu ograniczenia szkodliwego oddziaływania promieniowania słonecznego na powierzchnie izolatorów kompozytowych, producenci elastomerów silikonowych stosują dodatek niewielkiej ilości takich związków jak ZnO_2 i TiO_2 , które absorbują promieniowanie UV [38]. Oprócz degradowego działania ultrafioletu może być również źródłem częściowej regeneracji hydrofilnych powierzchni - co zostało przedstawione w pracy [91].

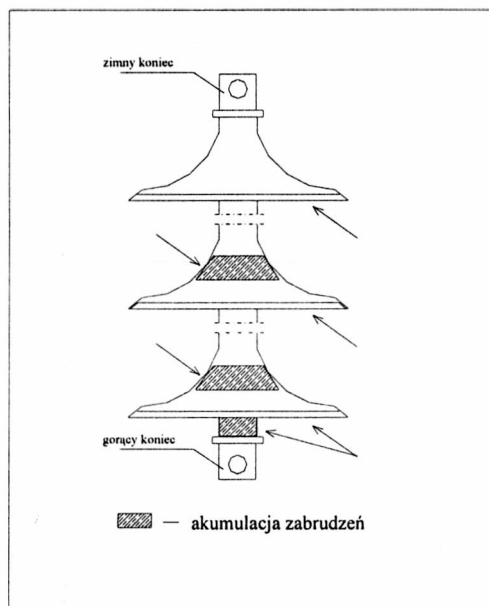
Promieniowanie UV naraża w szczególności powierzchnie górnego klosza oraz krawędzie pozostałych kloszy, w przypadku izolatorów odciągowych narażane są wszystkie oświetlane powierzchnie.

4.1.3. Wpływ obecności zabrudzeń.

Rozważania tego podrozdziału dotyczą tylko zanieczyszczeń typu przemysłowego z uwagi na uwarunkowania krajowe. Zwykle sama obecność zabrudzeń nie stanowi bezpośredniego zagrożenia dla bezawaryjnej pracy izolatorów. Dopiero w obecności podwyższonego poziomu wilgoci lub opadów atmosferycznych z zanieczyszczeń na powierzchni izolatorów klasycznych może tworzyć się elektrolit, który umożliwia przepływ prądu upływu będący w konsekwencji przyczyną awarii. Badania laboratoryjne wykazały wzrost konduktywności zabrudzenia sztucznego (kaolinu i soli) gdy wilgotność względna przekroczyła wartość 75% [8]. W podobny sposób ulega zmianie konduktywność zabrudzeń naturalnych (np. CaCl_2 , ZnCl_2) [8]. Obecnie produkowane izolatory klasyczne charakteryzują się zwykle dobrą samooczyszczalnością, a ich konstrukcje dostosowane są do różnych warunków zabrudzeniowych [66,93]. Intensywne opady atmosferyczne i wiatr oczyszczają zabrudzone powierzchnie tych izolatorów, chociaż nie zawsze skutecznie. Konieczne jest wówczas okresowe mycie izolatorów lub pokrycie specjalnymi pastami, a ostatnio stałymi pokryciami izolatorowymi.

Natomiast na powierzchni izolatorów kompozytowych warstwa zakumulowanych zanieczyszczeń ulega stopniowej hydrofobizacji. Warstwa ta składa się zwykle z pyłów pochodzenia przemysłowego lub komunikacyjnego, kurzu i soli. Poranna rosa, mgła lub opady deszczu powodują stopniowe gromadzenie się pojedynczych kropeł wody, które w połączeniu z zabrudzeniem mogą tworzyć konduktywne obszary, zwłaszcza w miejscach o zwiększonej zwilżalności na powierzchni izolatora. W sprzyjających warunkach, przy odpowiednim rozkładzie kropeł wody z rozcieńczonymi zabrudzeniami mogą pomiędzy nimi zapalać się łuki cząstkowe, które z kolei prowadzą do dalszego wzrostu zwilżalności i w konsekwencji do przeskoku powierzchniowego [49,50,74]. Jeśli intensywne opady, zmyją częściowo shydrofobizowaną warstwę zanieczyszczeń powierzchnie takie stają się hydrofilne. Po okresie opadów - kiedy powietrze jest oczyszczone - intensywność promieniowania UV, które dociera do powierzchni ziemi jest największa. Następuje wówczas intensywne narażanie oczyszczonych, a więc nie ekranowanych (przez warstwę zabrudzeń) od ultrafioletu powierzchni. Akumulacja zabrudzeń na powierzchni izolatorów

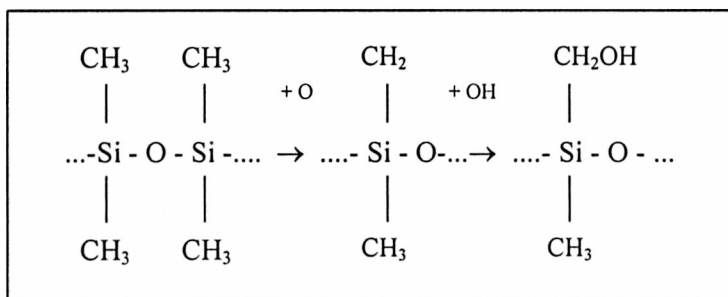
jest największa w obszarach słabo zmywanych przez opady atmosferyczne tzn. w obszarach gdzie klosze stykają się z pniem izolatora oraz pod kloszami (rys. 4.1.6).



Rys. 4.1.6 Akumulacja zabrudzeń na powierzchni izolatora.

4.1.4. Wpływ wyładowania koronowego.

Rozkład pola elektrycznego wzdłuż izolatora elektroenergetycznego jest bardzo nierównomierny, co jest przyczyną występowania wyładowania koronowego przy okuciu, które posiada potencjał przewodu linii wysokiego napięcia. Jak wynika z przeprowadzonych badań ryzyko występowania wyładowania koronowego maleje wraz ze wzrostem odległości tego okucia od najbliższego klosza [95]. O ile materiały, z których wykonane są izolatory klasyczne są niewrażliwe na działanie ulotu to w przypadku elastomerów silikonowych następuje dekompozycja struktury chemicznej opisana reakcją jak na rysunku 4.1.7.



Rys. 4.1.7 Dekompozycja elastomeru silikonowego pod wpływem wyładowania koronowego [39].

Pod wpływem wyładowania koronowego wydzielą się ozon, który przyłączając wodór z grupy metylowej powoduje jej dekompozycję. Powstała w ten sposób grupa

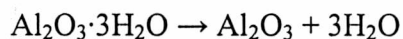
wodorotlenowa jest przyłączana do grupy CH_2 [39], zmiany te powodują wzrost zwilżalności powierzchni. Na powierzchni elastomeru tworzy się równocześnie hydrofilna „zeszklona” warstwa SiO_x uniemożliwiająca dyfuzję frakcji niskomolekularnych z wnętrza materiału. Dalsze oddziaływanie wyładowania koronowego może powodować pękanie „zeszklone” warstwy SiO_x [24]. Jeżeli pękanie hydrofilnej warstwy SiO_x jest warunkiem regeneracji hydrofobowości to obecność warstwy powierzchniowej może przyspieszyć efektywność dyfuzji frakcji niskomolekularnej szczególnie tam gdzie te pęknięcia występują (różnica współczynników dyfuzji). Wydaje się również, że obecność powierzchniowych zanieczyszczeń może ograniczać lokalne niszczące działanie wyładowań koronowych materiału - co już stwierdzono w przypadku promieniowania UV [35]. Zaobserwowane zjawisko regeneracji hydrofobowości w czasie trwania wyładowania koronowego tłumaczone jest również jako skutek wzrostu ilości tworzących się pod jego wpływem cyklicznych oligomerów silikonowych, które posiadają zdolność szybkiej migracji do powierzchni materiału, a także reorientacje grup metylowych [105]. Wyładowanie koronowe naraża powierzchnie sąsiadujące z „gorącym” okuciem izolatora tzn. dolną powierzchnię klosza wraz z pniem przy tym okuciu.

4.1.5. Wpływ wyładowania łukowego.

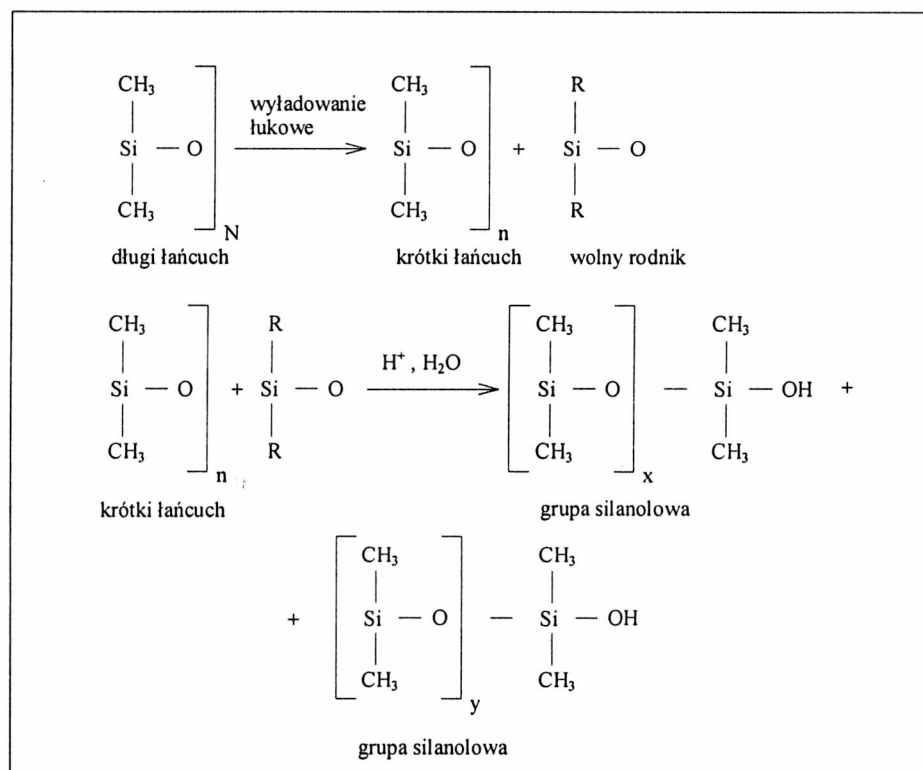
Izolatory kompozytowe w warunkach eksploatacyjnych w różnym stopniu i z różną intensywnością tracą niską zwilżalność całej powierzchni [85]. Lokalne zróżnicowanie przebiegu degradacji powierzchni może powodować wystąpienie nierównomiernego rozkładu stref zwilżalnych. Nierównomierny rozkład stref zwilżalnych i suchych – w niekorzystnych warunkach atmosferycznych np. podczas opadu – może być źródłem lokalnego wzrostu natężenia pola, a w następstwie wyładowań łukowych.

Wysoka energia cieplna wyładowań łukowych powoduje rozrywanie wiązań C-H i Si-CH₃ długich łańcuchów polimerowych „dzieląc” je na krótsze fragmenty (rys. 4.1.8)[31]. Procesowi temu towarzyszy wzrost zawartości wolnych rodników, a powstające mostki tlenowe sprzyjają formowaniu się grup silanolowych i cyklicznych oligomerów silikonowych. Ponadto pod wpływem wyładowań łukowych na powierzchni noże tworzyć się hydrofilna warstwa SiO_2 i SiC, która powoduje stopniowe obniżenie hydrofobowości powierzchni [105]. W celu poprawienia odporności materiału na działanie wyładowania łukowego producenci elastomerów silikonowych stasują dodatek trójwodnianego tlenku glinu (wypełniacz ATH – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) [38, 85]. Pod wpływem ciepła jakie wydziela się

podczas wyładowania łukowego następuje endotermiczna reakcja rozkładu wypełniacza ATH [38]:



Produktem tej reakcji jest woda, która odparowując chłodzi powierzchnie materiału ograniczając jej termiczną degradację.

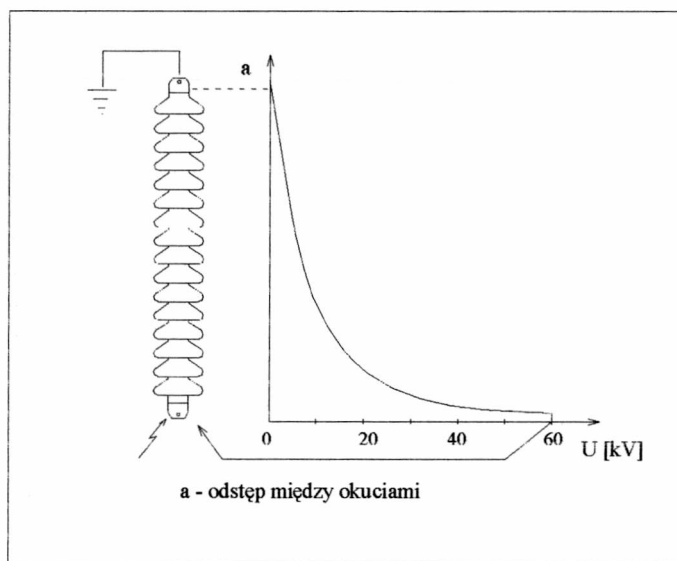


Rys. 4.1.8. Dekompozycja elastomeru silikonowego pod wpływem wyładowania łukowego [31].

4.1.6. Rozkład napięcia wzdłuż izolatora.

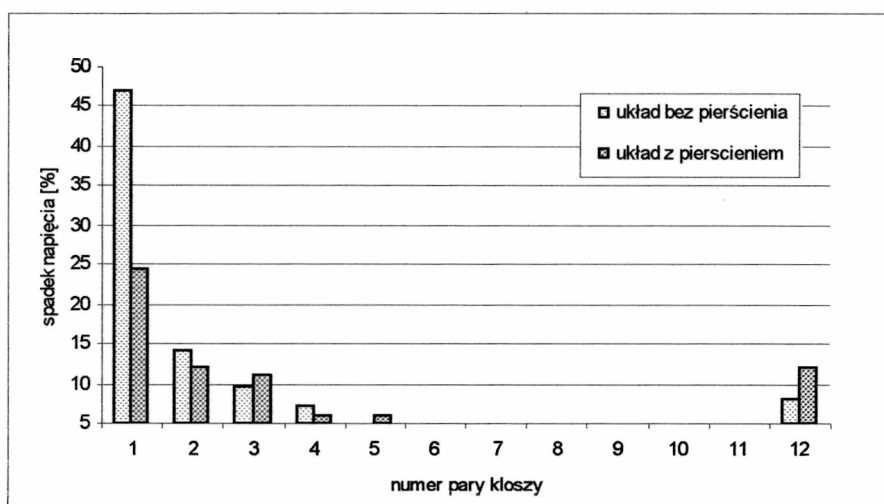
Głównym czynnikiem determinującym rozkład napięcia wzdłuż izolatora w linii napięcia przemiennego jest występowanie pojemności własnych i doziemnych, które umożliwiają przepływ prądu pojemnościowego. Ze względu na dużą rezystancję dielektryka i powietrza składowa rezystancyjna prądu jest pomijalnie mała. W skład pojemności układu wchodzi pojemności własne materiału izolatora, pojemności między poszczególnymi elementami izolatora a okuciami oraz pojemności względem ziemi. Występowanie wszystkich tych pojemności powoduje nierównomierność rozkładu napięcia wzdłuż izolatora (rys.4.1.9), a powstała niesymetria sprawia, że układ modelowy izolatora jest zbliżony do układu ostrze – płyta [57].

Na rysunku 4.1.9 przedstawiono rozkład napięcia na powierzchni izolatora długopniowego, które największą wartość osiąga przy okuciu posiadającym potencjał przewodu przesyłowego. Przy okuciu tym aktywność wyładowania koronowego będzie więc największa i dlatego w przypadku izolatora kompozytowego materiał osłonowy dolnego klosza i jego otoczenie będą intensywnie narażane wyładowaniem koronowym.



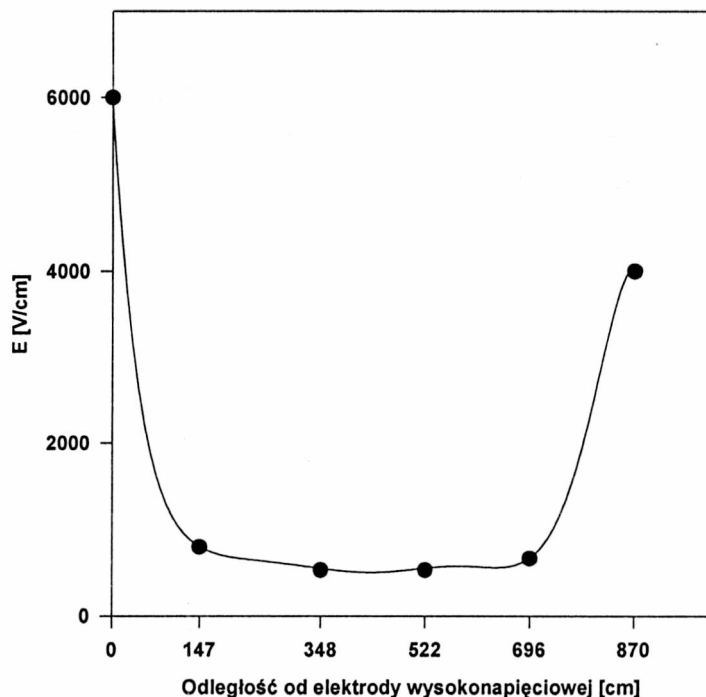
Rys. 4.1.9. Rozkład napięcia na powierzchni izolatora [57].

W pracy [25] przedstawiono wyniki pomiarów rozkładu spadków napięć na długopniowym izolatorze kompozytowym – rysunek 4.1.10. Metoda pomiaru, w której wykorzystano iskiernik kulowy mierzący spadek napięcia na poszczególnych parach kloszy obarczona jest niepewnością pomiarową rzędu 3% [22]. Spadki napięć na parach kloszy od 6 do 11 są bliskie zeru lub nie przekraczają 5%.



Rys. 4.1.10. Rozkład spadków napięcia na długopniowym izolatorze kompozytowym mierzony iskiernikiem kulowym dla izolatora bez pierścienia oraz wyposażonego w pierścień sterujący przy napięciu przemiennym [25].

Z rysunku 4.1.10 wynika, że znaczna część kloszy tego izolatora nie jest praktycznie narażana napięciowo. Symulacja komputerowa rozkładu natężenia pola elektrycznego wzdłuż pnia izolatora kompozytowego również wykazuje występowanie minimum w środkowej części izolatora – rysunek 4.1.11.

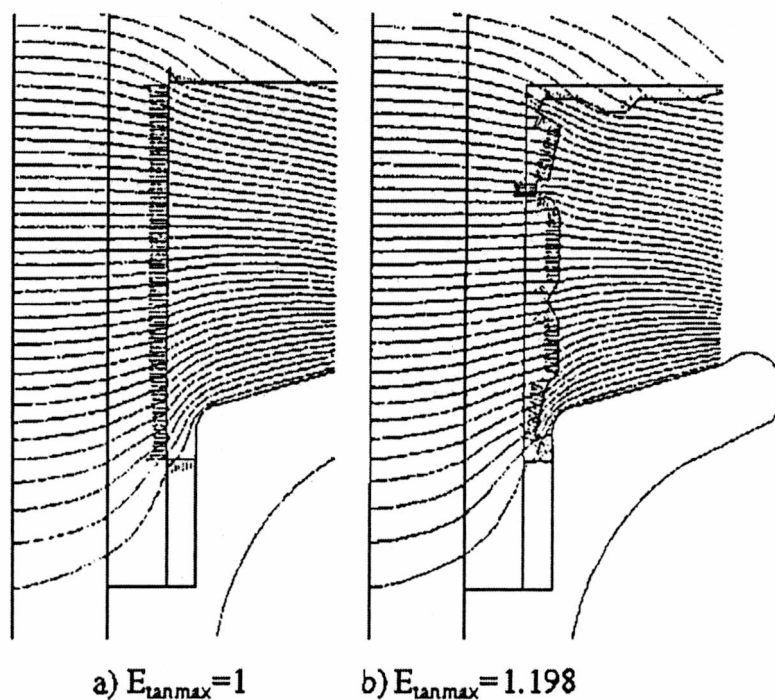


Rys. 4.1.11. Rozkład natężenia pola elektrycznego obliczony wzdłuż pnia izolatora kompozytowego przy napięciu przemiennym [25].

Wyniki pomiarów i symulacji komputerowej potwierdzają więc niewielki wpływ narażeń elektrycznych na środkowe segmenty izolatora kompozytowego. Mając na uwadze wybór testów, których zadaniem byłaby ocena właściwości materiałów osłonowych można zauważyć, że dla środkowej części izolatora (klosze 6-11) dominującym narażeniem będzie oddziaływanie opadów atmosferycznych, promieniowania UV lub opadu zanieczyszczeń, a w niewielkim stopniu oddziaływanie prądów upływu i związanych z nimi wyładowań elektrycznych. Natomiast w przypadku otoczenia okuć w tym zwłaszcza okucia przy gorącym końcu izolatora dominującym czynnikiem starzającym mogą być wyładowania koronowe i wyładowania elektryczne związane z tworzeniem się suchych stref. W wyniku tych narażeń materiał osłonowy może lokalnie szybko tracić hydrofobowość, a wtedy intensywność oddziaływania zawilgocenia i opadu zanieczyszczeń może szybko rosnać.

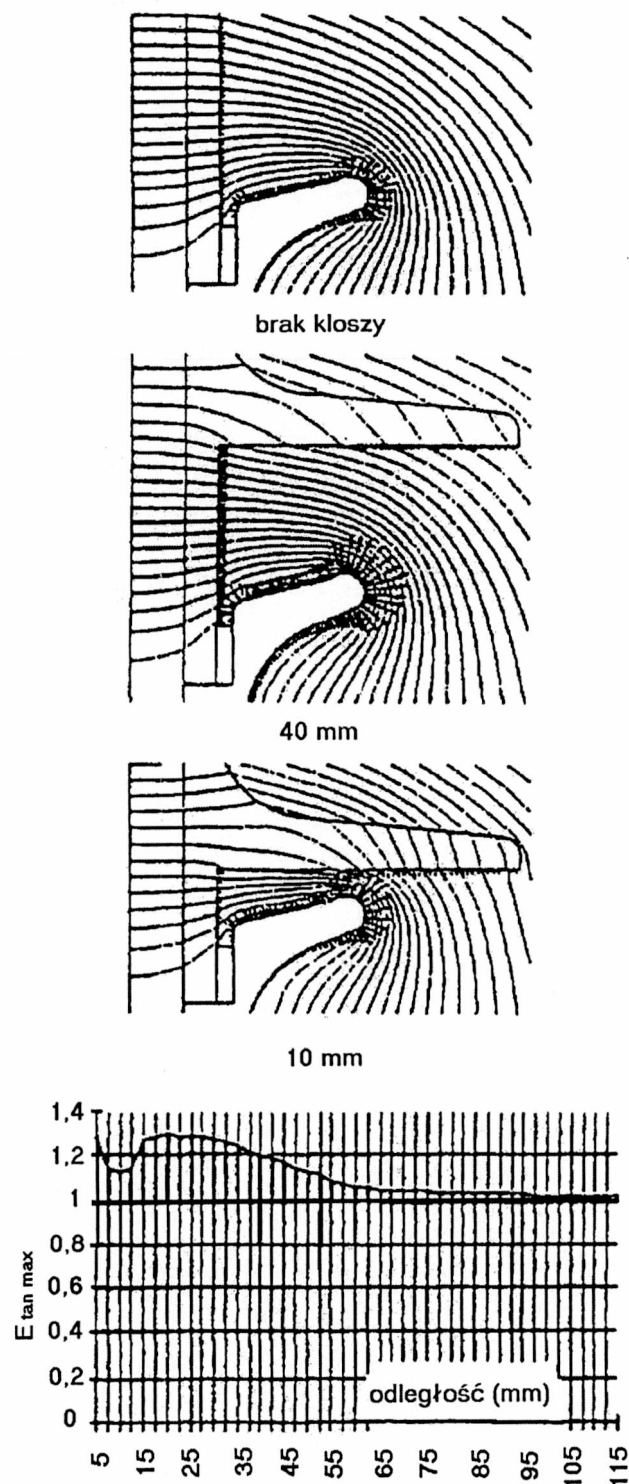
Dodatkowym czynnikiem potęgującym narażenia napięciowe izolatora kompozytowego w otoczeniu jego okuć może być obecność szwu na powierzchni materiału osłonowego [77,95].

Na rysunku 4.1.11 przedstawiono porównanie rozkładu pola elektrycznego na powierzchni izolatora bez szwu (a) oraz ze szwem (b). Obecność szwu powoduje zwiększenie nierównomierności pola, wzrost składowej E_{tanmax} oraz sprzyja rozwojowi wyładowania koronowego. W celu lepszego zobrazowania przedstawionego zjawiska pokazany rozkład pola jest obrócony o kąt 90° , dlatego składowa styczna również jest obrócona o kąt 90° .



Rys. 4.1.11. Model obrazujący zniekształcenie rozkładu pola spowodowanego obecnością szwu na powierzchni izolatora kompozytowego-(a) układ bez szwu oraz (b) ze szwem. [77].
Rozkład pola został obrócony o kąt 90° w celu lepszego zobrazowania zjawiska.

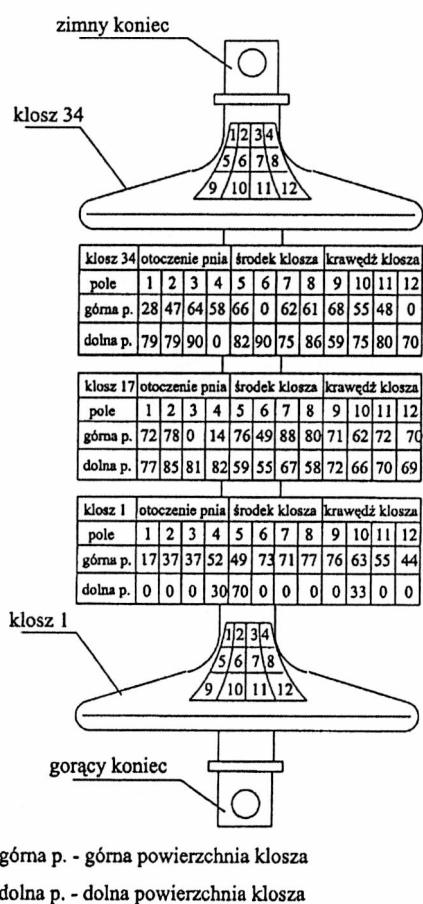
Na rysunku 4.1.12 przedstawiono przebieg linii sił pola na osłonie izolatora kompozytowego oraz wykres wartości składowej stycznej pola elektrycznego w funkcji odległości od okucia. Jak wynika z przedstawionego rysunku niewielka odległość okucia od powierzchni dolnego klosza intensyfikuje narażenia związane z wpływem rozkładu napięcia na postęp starzenia materiału osłonowego.



Rys. 4.1.12. Względna wartość składowej stycznej natężenia pola elektrycznego $E \tan \max$ w funkcji odległości między kloszem i metalowym kolnierzem [77]. Rozkład pola został obrócony o kąt 90° w celu lepszego zobrazowania zjawiska.

4.2. Odzworowanie narażeń środowiskowych i eksploatacyjnych w badaniach laboratoryjnych.

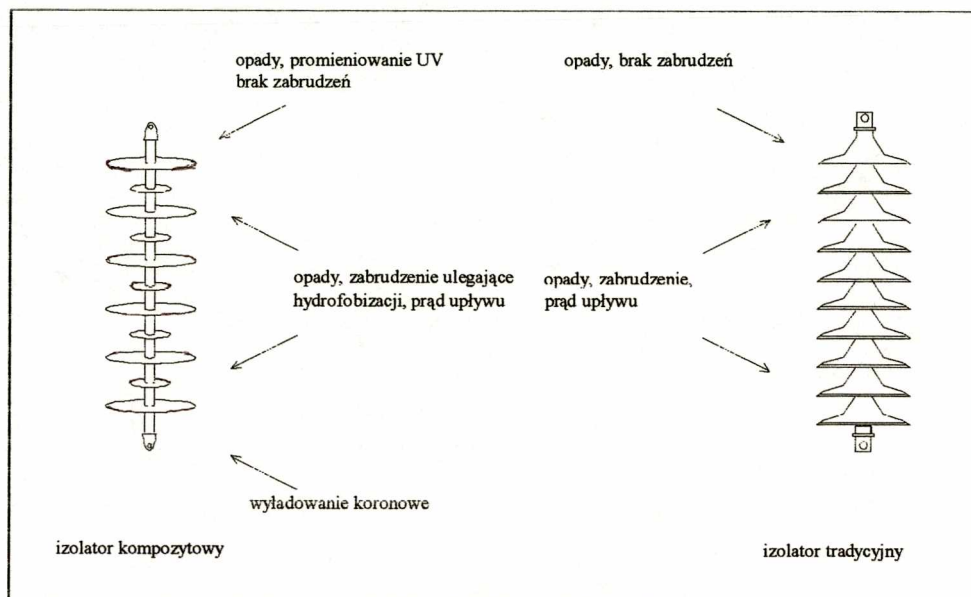
Z dotychczas przeprowadzonych analiz wynika, że występują istotne różnice w sposobie narażania izolatorów tradycyjnych i kompozytowych zewnętrznymi czynnikami atmosferycznymi i eksploatacyjnymi. Jak wcześniej zaznaczono materiały, z których wykonane są izolatory tradycyjne charakteryzują się brakiem wrażliwości na działanie promieniowania UV, wyładowania koronowego czy wyładowania łukowego związanego z przepływem prądów upływu. Odporność na powyższe narażenia stanowi istotną różnicę w porównaniu do izolatorów kompozytowych, dla których materiałem osłonowym jest elastomer silikonowy. Na rysunku 4.2.1 przedstawiono schematyczny rozkład dynamicznych kątów zwilżania zmierzonych na wybranych kloszach izolatora kompozytowego, który był eksploatowany przez okres 3 lat w warunkach przeciętnych zabrudzeń. Analiza wyników pomiarów kątów dynamicznych wskazuje, że rozkład zwilżalności powierzchni starzonych w warunkach eksploatacyjnych izolatorów jest silnie



Rys. 4.2.1 Rozkład kątów zwilżania na wybranych kloszach izolatora [85].

nierównomierny [85], co oznacza lokalne zróżnicowanie przebiegu degradacji powierzchni izolatora.

Na rysunku 4.2.2 zestawiono czynniki degradujące izolatory elektroenergetyczne w warunkach eksploatacyjnych. I tak opady atmosferyczne silnie oddziałują na krawędzie wszystkich kloszy (rys. 4.2.3), a także na górną powierzchnię najwyższego klosza (klosz nr 34 rys.4.2.1).



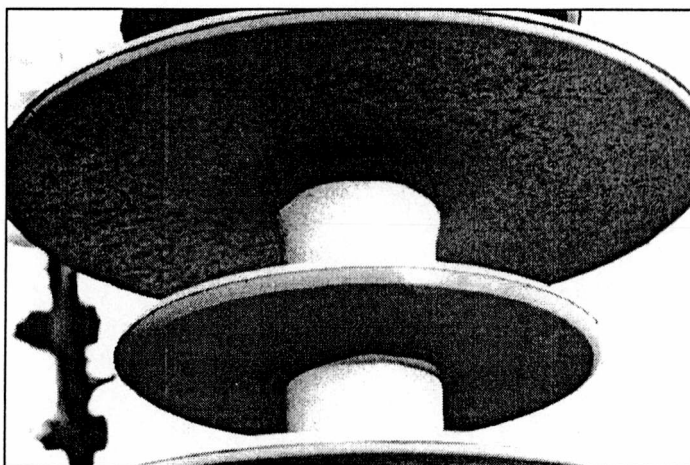
Rys. 4.2.2 Czynniki degradujące powierzchnie izolatora kompozytowego i klasycznego.



Rys. 4.2.3 Hydrofilna krawędź klosza izolatora kompozytowego.

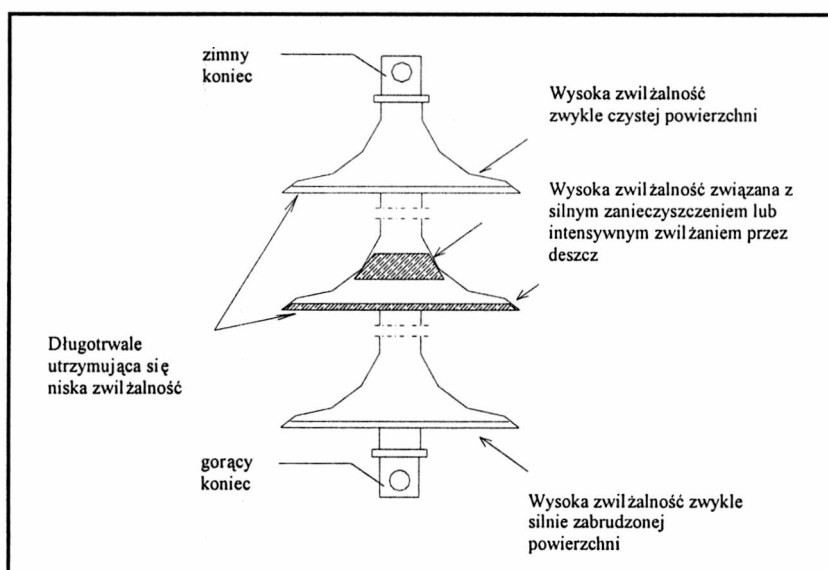
Powierzchnie te są również bardziej degradowane przez promieniowanie UV. Z czasem prowadzić to może do wzrostu zwilżalności opisanych elementów. Zabrudzenia akumulują się na nie zmywanych przez opady górnych powierzchniach kloszy w sąsiedztwie pnia izolatora oraz pod kloszami (rys. 4.2.4). Istotnym czynnikiem degradującym dolne powierzchnie klosza w pobliżu okucia jest obecność wyładowania koronowego, którego

efektem jest utrata hydrofobowości (klosz nr 1 rys.4.2.1). Rozkład zwilżalnych powierzchni izolatora kompozytowego na skutek oddziaływania czynników pogodowych



Rys. 4.2.4 Akumulacja zabrudzeń na nie zmywanych przez opady atmosferyczne powierzchniach izolatora.

zależy od warunków i okresu eksploatacji i po kilku latach [85] może być taki jak na rysunku 4.2.5.



Rys. 4.2.5 Konsekwencje narażania izolatora kompozytowego w warunkach eksploatacyjnych.

Po długim okresie eksploatacji nie narażane bezpośrednio przez opady atmosferyczne dolne powierzchnie kloszy mogą również stracić niską zwilżalność (rys. 4.2.6). Wydaje się, że w przypadku kompozytowych izolatorów długopniowych wynika to głównie z niewielkich kątów nachylenia dolnych powierzchni kloszy co sprzyja długotrwałemu utrzymywaniu się wody i wilgoci. Nachylenia rozpatrywanych powierzchni uwarunkowane są z kolei względami technologicznymi.



Rys. 4.2.6 Niska zwilżalność dolnej powierzchni klosza na izolatorze kompozytowym po około 20 letnim okresie eksploatacji.

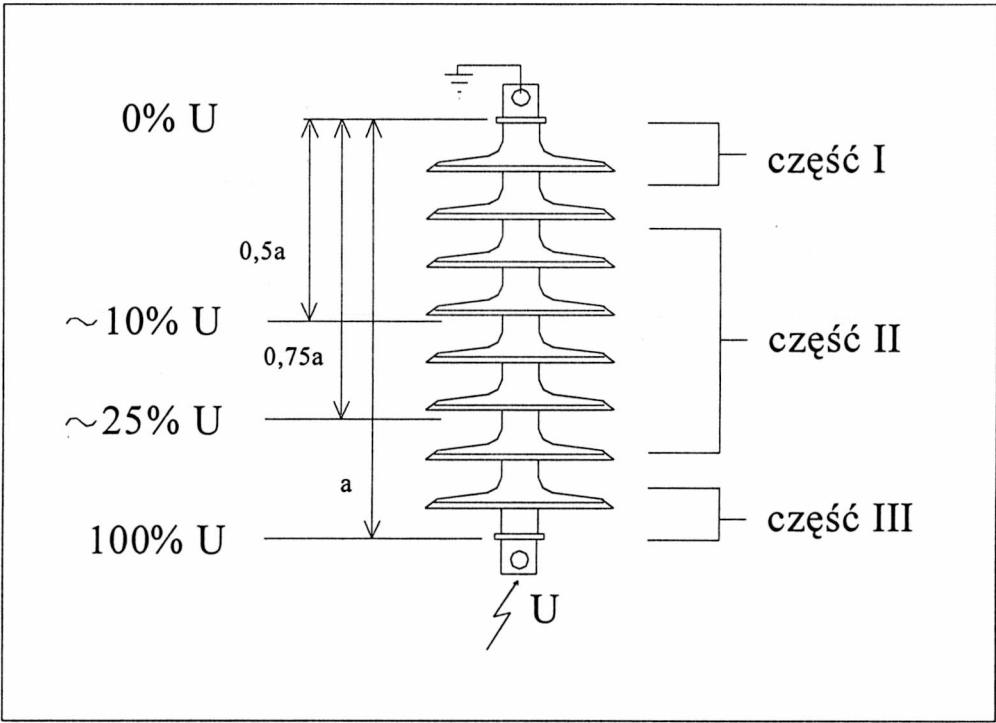
W laboratoryjnych badaniach przyspieszonego starzenia elastomerów silikonowych należy dążyć do tego aby były one możliwie wiernym odwzorowaniem narażeń przedstawionych na rysunku 4.2.2. Można wstępnie przyjąć, że starzenie w komorze klimatycznej umożliwia odwzorowanie warunków symulujących opady oraz promieniowanie UV, test długotrwałego oddziaływania wody odwzorowuje narażenia związane z intensywnymi opadami i nawilżaniem materiału, RWDT odwzorowuje narażenia związane z przepływem prądu upływu w obecności zabrudzeń, oddziaływanie wyładowania koronowego symuluje narażenia jakim poddawane są dolne części izolatora, test pochylej próbki odwzorowuje warunki przepływu prądu po górnych powierzchniach kloszy czystych lub zabrudzonych przy ich nawilgacaniu. Zestawienie wyników powyższych eksperymentów, prowadzonych z uwzględnieniem średnich wielkości narażeń pogodowych występujących w warunkach krajowych (rozdział 3) może pozwolić na przybliżone oszacowanie dynamiki zmian zwilżalności powierzchni izolatorów w osłonach badanego elastomeru silikonowego.

Na rysunku 4.2.7 przedstawiono szacunkowo procentowy rozkład napięcia wzdłuż izolatora oraz podział jego powierzchni w zależności od rodzaju dominujących narażeń.

Dominujące narażenia dotyczące części I zostały odwzorowane testami beznapięciowymi, ze względu na prawie znikome oddziaływanie narażeń napięciowych tej części izolatora.

W części II dominującymi narażeniami będą narażenia pnia oraz części klosza bezpośrednio przy pniu. Narażenia te zostały odwzorowane w zmodyfikowanym teście pochylej próbki oraz teście koła śladu pełnego i erozji (RWDT).

Najbardziej intensywne narażenia napięciowe dolnej powierzchni klosza zostały odwzorowane w teście wyładowania koronowego – część III.

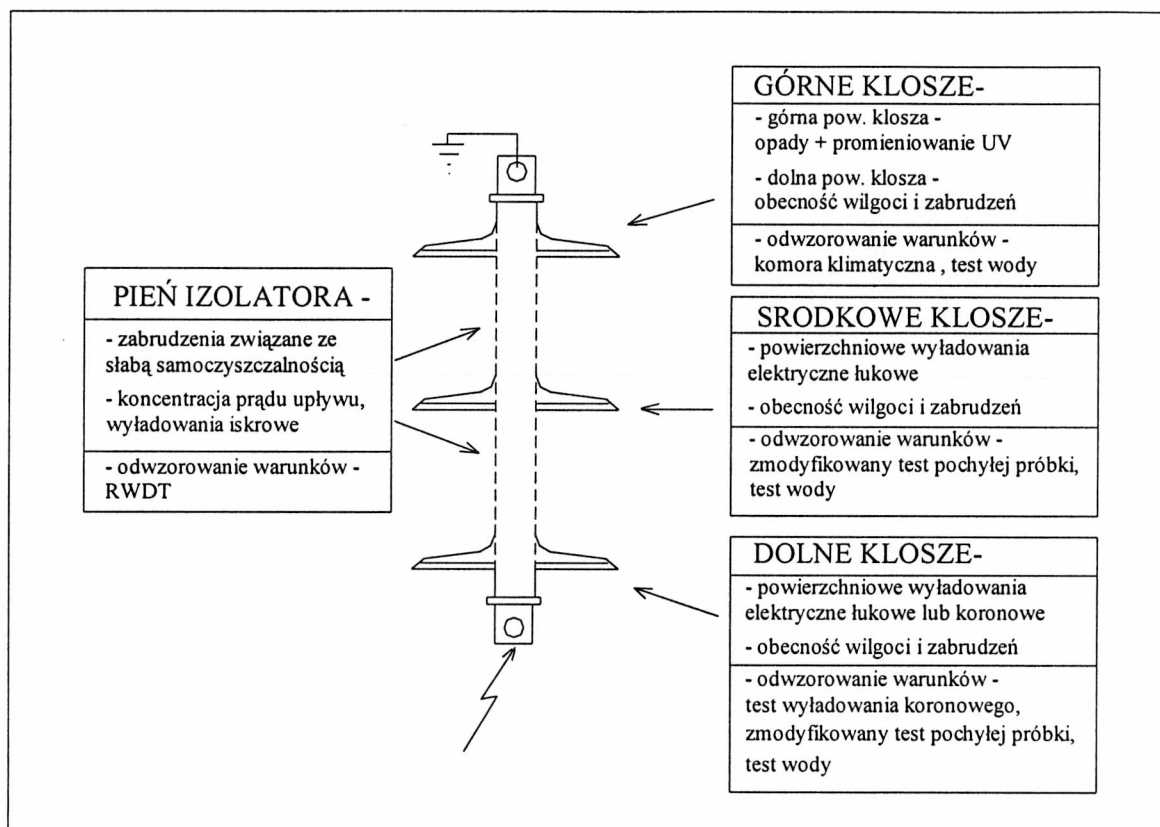


Rys. 4.2.7 Podział izolatora w zależności od rodzaju dominującego narażenia.

	Dominujące narażenia	Test starzeniowy odwzorowujący narażenia
część I (górną powierzchnię górnego klosza)	opady atmosferyczne, promieniowanie UV	test w komorze klimatycznej "ATLAS", test wody,
część II (pień, obszar kloszy przy pniu)	powierzchniowe wyładowania elektryczne, obecność zabrudzeń,	RWDT test, zmodyfikowany test pochyłej próbki,
część III (powierzchnia dolnego klosza, przy okuciu)	powierzchniowe wyładowania elektryczne, wyładowanie koronowe, obecność zabrudzeń,	test wyładowania koronowego,

Tabela 4.2.1 Zestawienie dominujących narażeń na poszczególnych częściach izolatora (rys. 4.2.7) i odwzorowujących je testów starzeniowych

W tabeli 4.2.1 zestawiono dominujące narażenia, jakie występują na poszczególnych częściach izolatora przedstawionego na rysunku 4.2.7. Oddziaływanie prądu upływu związane jest z rozkładem napięcia i obecnością zabrudzeń (rys. 4.2.7). Dlatego też, obecność prądu upływu jest dominującym narażeniem w części II (rys. 4.2.7), zwłaszcza w otoczeniu pnia izolatora.



Rys. 4.2.8 Model narażeń eksploatacyjnych i ich odwzorowanie w badaniach laboratoryjnych.

Podsumowaniem przeprowadzonych rozważań jest rysunek 4.2.8, na którym schematycznie zestawiono narażenia eksploatacyjne poszczególnych części izolatora wraz z odwzorowującymi je testami laboratoryjnymi.

5. Tezy pracy i program badań.

Postęp w dziedzinie przyspieszonych laboratoryjnych badań starzeniowych materiałów osłonowych jest niewystarczający, a próby oparcia oceny przydatności izolatora kompozytowego do eksploatacji o jeden prosty znormalizowany test na przykład mgły solnej, a wcześniej test karuzeli (Merry-go-round) skończyły się niepowodzeniem. Uważa się więc obecnie, że do oceny materiału osłonowego jest potrzebna grupa starannie dobranych testów, których przeprowadzenie pozwoli ocenić w sposób kompleksowy badany materiał [55,96]. Zasadnicze znaczenie mają tutaj procesy degradacji materiału osłonowego, których poznanie będzie miało bezpośredni wpływ na świadomy dobór izolatora kompozytowego do określonych warunków eksploatacji i jego czas życia w tych warunkach.

Na podstawie dotychczas opublikowanych wyników badań laboratoryjnych i terenowych materiałów osłonowych oraz wyników przeprowadzonych badań własnych autor stwierdził, że dynamika procesu degradacji elastomerów silikonowych zależy nie tylko od rodzaju gum ale także od sposobu ich starzenia w tym zwłaszcza od obecności powierzchniowych zanieczyszczeń i ich właściwości fizyko-chemicznych. Czynniki te wpływają przede wszystkim na przebieg procesu utraty i odzysku niskiej zwilżalności powierzchni gum silikonowych, który to proces stanowi o unikalnych właściwościach izolatorów kompozytowych podczas eksploatacji.

Istotne znaczenie ma również taki wybór testów aby można było ocenić gumy handlowo dostępne ponieważ użytkownik izolatorów dysponuje jedynie bardzo niepełną informacją katalogową.

Wszystkie te spostrzeżenia pozwoliły na sformułowanie następujących tez:

- **Na podstawie wyników wybranych grup testów laboratoryjnych można przewidywać zachowanie się handlowo dostępnych gum silikonowych w warunkach narażeń eksploatacyjnych ponieważ procesy degradacji gum zależą od rodzaju gum, sposobu ich narażania podczas starzenia i ulegają zmianom w obecności powierzchniowych zanieczyszczeń.**
- **Nierównomierność rozkładu zwilżalności na powierzchni izolatora kompozytowego spowodowana różnym stopniem zdegradowania materiału osłonowego może przyczynić się do powstania nierównomiernej warstwy elektrolitycznej o różnych konduktywnościach lokalnych, a w konsekwencji może doprowadzić do wystąpienia przeskoaku zabrudzeniowego.**

W celu udowodnienia tak wybranych tez autor skoncentrował się na przeprowadzeniu odpowiednich eksperymentów laboratoryjnych (poznanie procesu degradacji gum) jak również na analizie dotychczas opublikowanych bardzo nielicznych opisów mechanizmów przeskoku zabrudzeniowego na gumach silikonowych, w tym zwłaszcza na wskazaniu wzajemnego warunkowania się procesu degradacji gum i możliwości wystąpienia przeskoku zabrudzeniowego na izolatorze kompozytowym przy napięciu roboczym.

Jest to o tyle istotne, że autorowi nie są znane doniesienia literaturowe wykazujące możliwość wystąpienia przeskoku zabrudzeniowego na izolatorach kompozytowych w osłonach z elastomerów silikonowych przy wartościach natężenia pola elektrycznego spotykanych w eksploatacji.

6. Metodyka badania gum silikonowych. Opisy eksperymentów.

6.1. Obiekt badań.

Przedmiotem badań były próbki wykonane z dwóch typów gum silikonowych HTV i RTV pochodzące od uznanych producentów. W tabeli 6.1.1 przedstawiono ich podstawowe dane katalogowe.

	Materiał RTV	Materiał HTV
zawartość napelnacza	~ 70%	~ 70%
czas utwardzania	30 minut w temp. 25 C przy wilgotności 50%	1 godz. w temp. 150 C w piecu z cyrkulacją powietrza
ciężar właściwy [g/cm ³]	1,13	1,52
tangens delta	0,0055	0,01
opór właściwy [Ω/cm]	3,7x 10 ¹⁵	10 ¹⁵
przenikalność względna	3,9	4,0

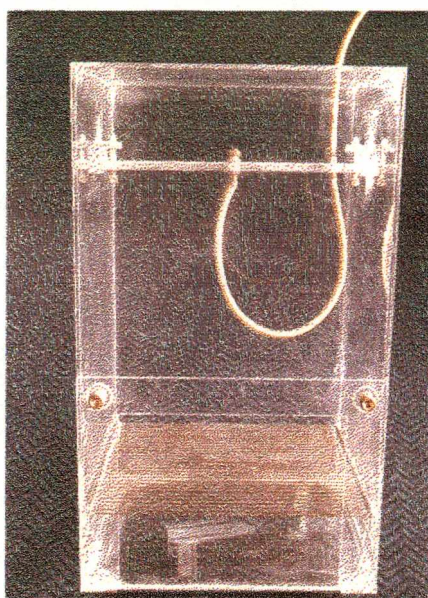
Tabela 6.1.1 Zestawienie danych katalogowych dotyczące badanych materiałów[10].

Pokrycie silikonowe RTV było naniesione na 2 rodzaje podłoża - z tworzywa sztucznego oraz ze szkła. Próbki obu badanych materiałów posiadały kształt prostokątny o wymiarach 65 x 135 mm. W przypadku eksperymentu pochyłej próbki - ze względów technicznych – rozmiary te zostały zmniejszone i wynosiły 50 x 120 mm. Podobnie w przypadku eksperymentu koła śladu pełnego i erozji (Rotating Wheel Deep Test (RWDT))[2,5,44,47,48], w którym walcowy kształt próbek o średnicy 30 mm i długości 100 mm był narzucony przez warunki testu. Pokrycie RTV o średniej grubości 0,46+/-0,03 mm było również i w przypadku tego testu (RWDT) naniesione na dwa rodzaje podłoża, którymi były ceramika oraz włókno szklane. Grubość nałożonego na płaskie próbki elastomeru RTV po zwulkanizowaniu wynosiła odpowiednio 0,24+/-0,04 mm, 0,43+/-0,07 mm i 0,62+/-0,08 mm dla podłoża z tworzywa sztucznego oraz 0,20+/-0,05 mm, 0,38+/-0,05 mm i 0,60+/-0,08 mm dla podłoża szklanego [4]. Natomiast płaskie próbki materiału HTV posiadały grubość 3 i 5 mm.

6.2. Opis metody zabrudzania próbek.

Przygotowany program badań przewidywał analizę dynamiki procesu starzenia próbek czystych oraz zabrudzanych kaolinem z solą w proporcji wagowej 10:1, a także pokrytych zabrudzeniem naturalnym zebrany z powierzchni izolatorów umieszczonych w pobliżu huty miedzi w Głogowie [35,53]. Uzasadnieniem zabrudzania badanych materiałów jest fakt, że w warunkach naturalnych utrata i regeneracja właściwości hydrofobowych materiałów osłonowych izolatorów odbywa się zawsze podczas obecności zabrudzeń na powierzchni izolatorów. Zgodnie z podawanymi w literaturze wynikami pomiarów gęstość osadu soli na naturalnie zabrudzonych izolatorach nie przekracza zwykle $0,1 \text{ mg/cm}^2$ dlatego przyjęty równoważnik gęstości osadu soli ESDD utrzymywano na poziomie $0,09 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$ [20,85].

W celu odwzorowania warunków w jakich izolatory ulegają zabrudzeniu zbudowano specjalną komorę do równomiernego nakładania zabrudzeń na badane próbki gum (rys. 6.2.1).



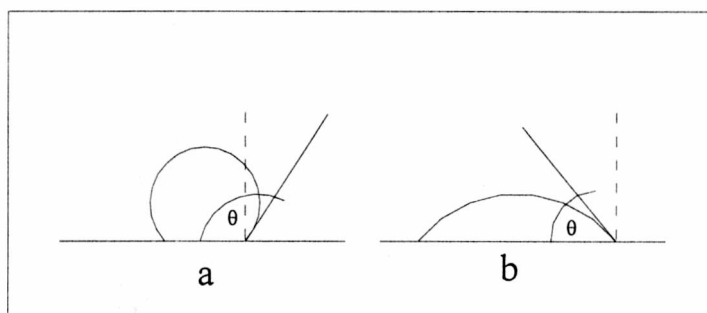
Rys.6.2.1. Komora zabrudzeniowa.

Komorę o wymiarach podstawy $40 \times 40 \text{ cm}$ i wysokości 70 cm przedstawioną na rys. 6.2.1 wykonano z przezroczystego poliwęglanu. W dolnej jej części znajduje się półka w postaci metalowego rusztu, na której układa się próbki. Dostęp do wnętrza komory umożliwia otwierana pokrywa. W górnej części, na wysokości 60 cm , dokładnie na przecięciu przekątnych podstawy zainstalowano dyszę o odwróconą swoim wylotem do góry. Poprzez otwór w górnej ścianie do wnętrza komory jest wprowadzony gumowy wąż podłączony do dyszy, przez który wdmuchuje się zanieczyszczenia. Wykorzystywane w

pracy zabrudzenia były wcześniej rozdrabniane i osuszane z wilgoci w piecu. Wdmuchnięty pył zabrudzeń swobodnie opadał na powierzchnie próbek ułożonych na półce. Odpowiednio dobrana średnica dyszy uniemożliwia przedostanie się większych ziaren zabrudzeń. Taki sposób równomiernego zabrudzania może w przybliżeniu odpowiadać warunkom w jakich zabrudzane są izolatory kompozytowe w warunkach eksploatacyjnych.

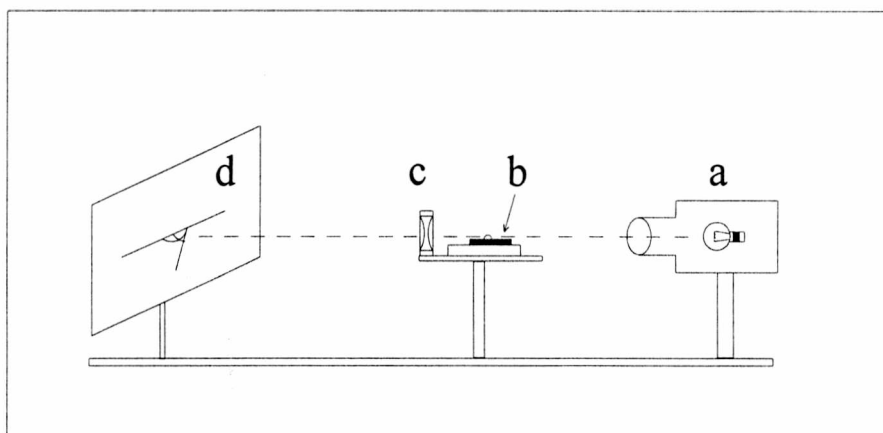
6.3. Pomiary kątów zwilżania.

Pomiary dynamicznych kątów zwilżania elastomerów silikonowych uważane są za wiarygodną metodę oceny stanu zwilżalności badanych powierzchni [45,52,53,91]. Kąty statyczne służą natomiast do orientacyjnej oceny stanu zwilżalności i stanu gładkości powierzchni badanego materiału. Sposób pomiaru został przedstawiony na rysunku 6.3.1.



Rys. 6.3.1 Pomiar statycznych i dynamicznych kątów zwilżania;
a – pomiar kąta o wartości większej od 90° i b – o wartości mniejszej.

Dlatego też wyniki pomiarów kątów zwilżania były jednym z kryteriów oceny badanych elastomerów. Wykorzystywano do tego celu zestaw złożony z silnego źródła światła,



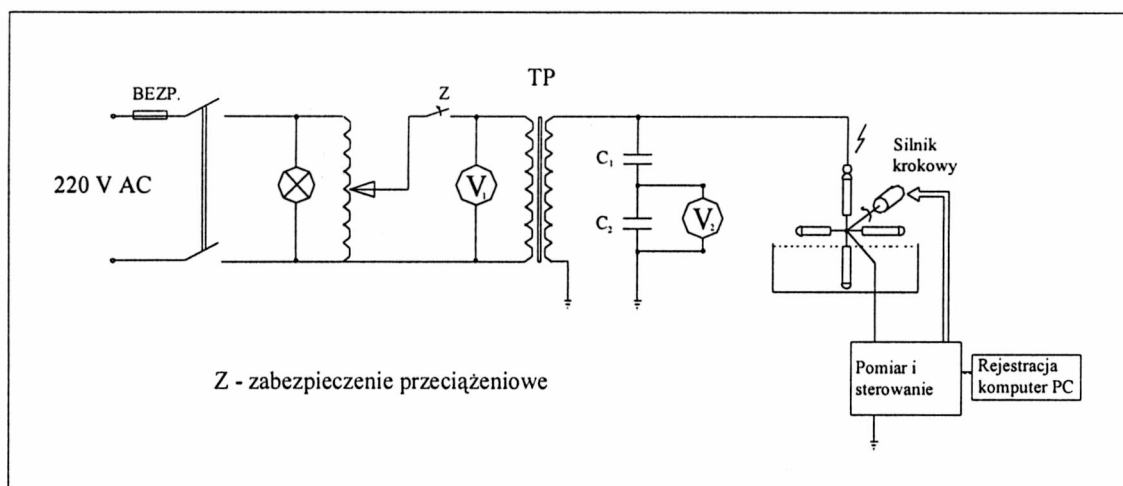
Rys. 6.3.2 Pomiar kątów zwilżania metodą projekcyjną;
a – źródło światła
b – badana próbka
c – układ optyczny
d – ekran z odwróconym i powiększonym obrazem.

układu optycznego i ekranu, na którym otrzymywano obraz badanej powierzchni (rys. 6.3.2). Do umieszczania kropeł wody wykorzystywano mikropipetę o pojemności 100 mikrolitrów. Wartością graniczną przyjęto zakres kątów $40-45^\circ$, poniżej którego materiał uznaje się za hydrofilny. Każdy wynik odpowiadał średniej z 5 - 6 pomiarów. W przypadku eksperymentu RWDT do pomiarów kątów zwilżania wykorzystano goniometr [84,91].

Przy ocenie stanu zwilżalności powierzchni izolatorów eksploatowanych posłużono się metodą STRI [36,81]. W metodzie tej stan zwilżalności zroszonych wodą powierzchni klasyfikuje się według podziału na 7 klas, gdzie klasa 1 odpowiada powierzchni całkowicie hydrofobowej, a 7 całkowicie hydrofilnej.

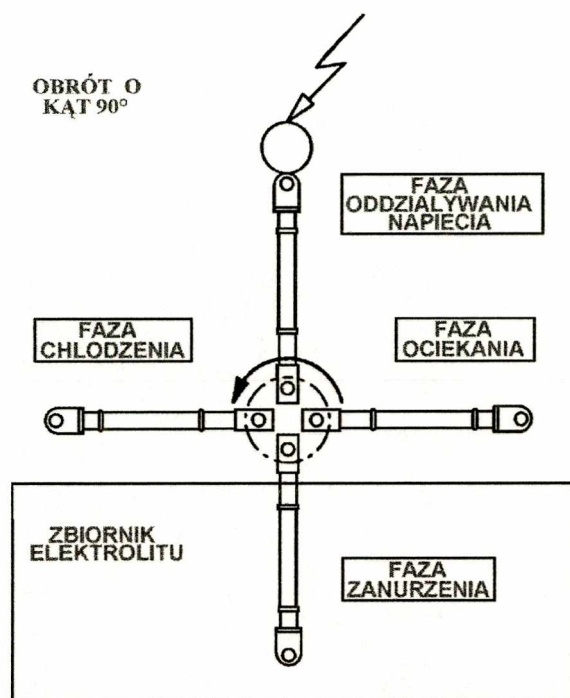
6.4. Test starzeniowy metodą koła śladu pełnego lub erozji (Rotating Wheel Deep Test - (RWDT)).

Na rysunku 6.4.1 przedstawiono schemat układu pomiarowego wykorzystanego w eksperymencie koła śladu pełnego lub erozji (RWDT).



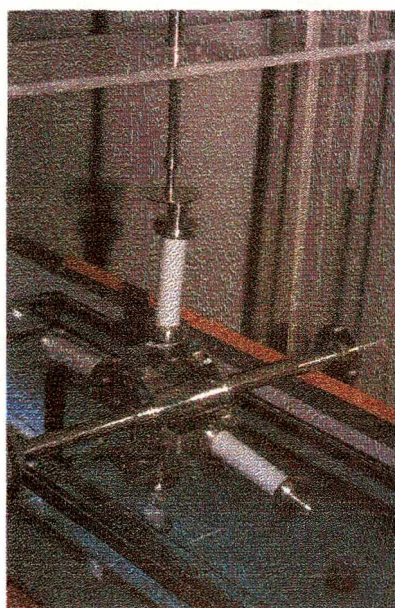
Rys. 6.4.1 Schemat układu pomiarowego.

Stanowisko badawcze umożliwiało rejestrację prądów upływu oddzielnie dla każdej z 4 badanych próbek. Na 1 pełny cykl eksperymentu składały się 4 fazy pokazane na rysunku 6.4.2. Każda z faz cyklu trwała 1 minutę, a czas zmiany pozycji koła z próbkami około 3 sekund. Zbiornik użyty w eksperymencie posiadał pojemność 100 litrów. Przed rozpoczęciem kolejnego nowego testu jego wewnętrzne ścianki były przecierane roztworem alkoholu, a następnie wycierane do sucha. Do próbek obu materiałów przykręcano i przyklejano elektrody ze stali nierdzewnej (klej - Elastosil N199 - WACKER), następnie całą ich powierzchnię przecierano roztworem alkoholu (rozdział



Rys. 6.4.2. Sposób narażania próbek elastomeru silikonowego w teście RWDT.

6.1). Dodatkowo próbki materiału HTV były umieszczane w piecu w temp. 100°C na 72 godziny w celu uniformizacji zwilżalności powierzchni. Z wygrzewania zrezygnowano przy badaniu pokryć RTV, dla których podłożem była ceramika. Do przygotowania roztworu soli wykorzystywano wodę destylowaną. Widok stanowiska badawczego pokazano na rysunku 6.4.3.



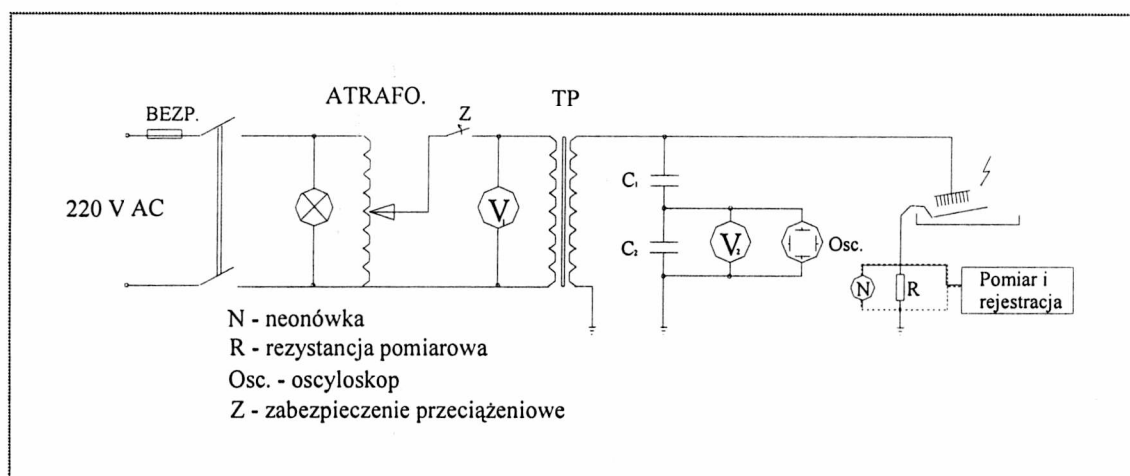
Rys. 6.4.3. Widok stanowiska badawczego.

Eksperyment skupiał się na okresie wczesnego starzenia, dla którego wartość graniczną prądu przyjęto na poziomie 1 mA. Zgodnie z tym założeniem z testu wyłączono próbki, dla których wartość ta została przekroczona w sposób ciągły [68]. Przed i po eksperymencie dokonywano pomiarów kątów zwilżania statycznych i dynamicznych wykorzystując do tego celu goniometr [84,91].

Zdaniem autora narażanie materiału w tej metodzie badawczej można odnosić do elementów powierzchni izolatora kompozytowego poddawanych silnemu działaniu pola elektrycznego i kondensacji wody lub zawilgocenia. W takich warunkach na powierzchni silikonowej występują wyładowania iskrowe i łuki cząstkowe o wartości prądów mniejszych od 1 mA.

6.5. Test wyładowania koronowego

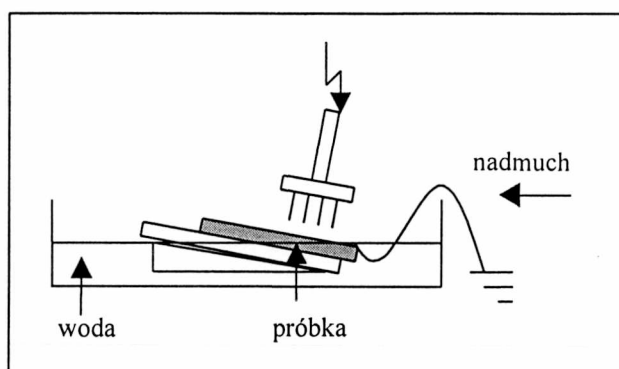
Na rysunku 6.5.1 przedstawiono schemat układu pomiarowego wykorzystanego w



Rys. 6.5.1. Schemat układu pomiarowego.

Podczas badań wpływu wyładowania koronowego na degradację gum silikonowych. Układ ten umożliwiał pomiar spadku napięcia na rezystancji pomiarowej i sprzężony był z komputerem pełniącym funkcję rejestratora (rys.6.5.1).

Stanowisko badawcze składało się z pojemnika z wodą, w którym umieszczony był uchwyt do próbek o regulowanym kącie nachylenia (rys. 6.5.2). Eksperyment prowadzono przy kącie nachylenia 5° w celu odwzorowania nachylenia dolnej powierzchni klosza izolatora. Specjalna elektroda wyposażona w kilkanaście równomiernie rozłożonych ostrzy umieszczona była równolegle nad badaną próbką w odstępnie $a = 1,2$ cm od jej powierzchni.



Rys. 6.5.2 Sposób narażania próbki z elastomeru silikonowego w teście wyładowania koronowego.

Elektroda ta była źródłem wyładowania koronowego. Obliczone natężenie pola elektrycznego E wynosiło około 25 kV/cm.

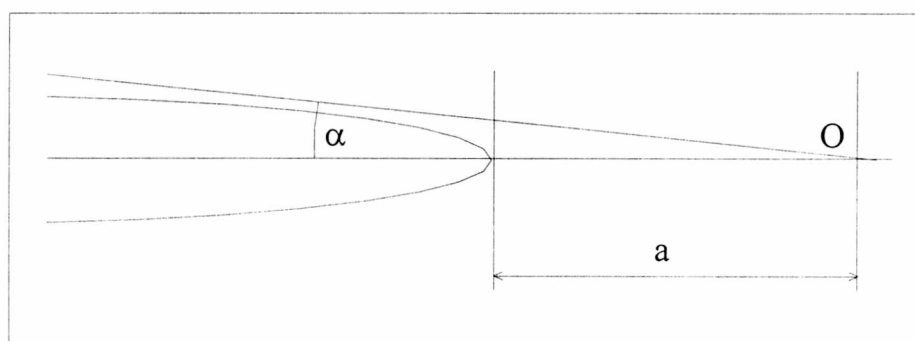
$$E_{\max} = \frac{U}{a} * \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha * \ln \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}} \quad (6.1)$$

skąd otrzymano

$$U = a * E_{\max} * \frac{\sin^2 \alpha * \ln \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{\cos \alpha} \quad (6.2)$$

gdzie a – odległość elektrody od próbki (1,2 cm),

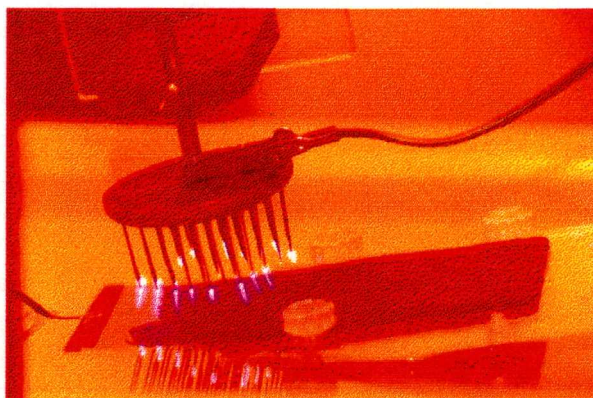
α –wartość średnia kąta zawartego pomiędzy osią pojedynczego ostrza, a styczną przechodzącą przez środek O (rys.6.5.3).



Rys. 6.5.3 Elektroda ostrzowa – kąt α .

Kąt α zmierzono wykorzystując do tego celu powiększalnik fotograficzny. Średnia wartość α wynosiła 15° .

Widok stanowiska badawczego sfotografowanego podczas wykonywania badań przedstawiono na rysunku 6.5.4.

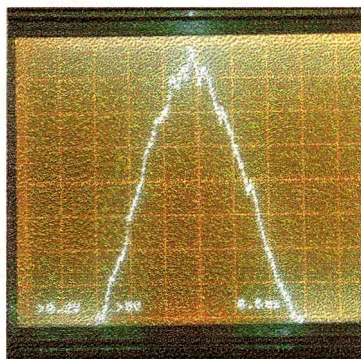


Rys. 6.5.4 Widok stanowiska badawczego.

Podczas procesu starzenia rejestrowano zmiany prądu wyładowania koronowego. Składowa pojemnościowa prądu wynosiła około 11 mikroamperów. Na rysunku 6.5.5 przedstawiono fragment krzywej napięcia w dodatnim półokresie odkształconej na skutek występowania intensywnych wyładowań ulotowych z elektrod ostrzowych.

Każda próbka po etapie starzenia, który dla materiału HTV trwał 8 godzin, a dla RTV - 16 poddawana była próbie odzysku hydrofobowości w temperaturze 40°C przez 200 godzin, a następnie - po dokonaniu pomiarów kątów zwilżania - ponownie poddawana starzeniu.

Można zauważyć, że w tej metodzie badawczej odwzorowano te elementy powierzchni izolatora, które są narażane wyładowaniami koronowymi, oddziaływaniem zawilgocenia lub opadu wody i powierzchniowych zanieczyszczeń. Takie warunki występują w otoczeniu gorącego końca izolatora.



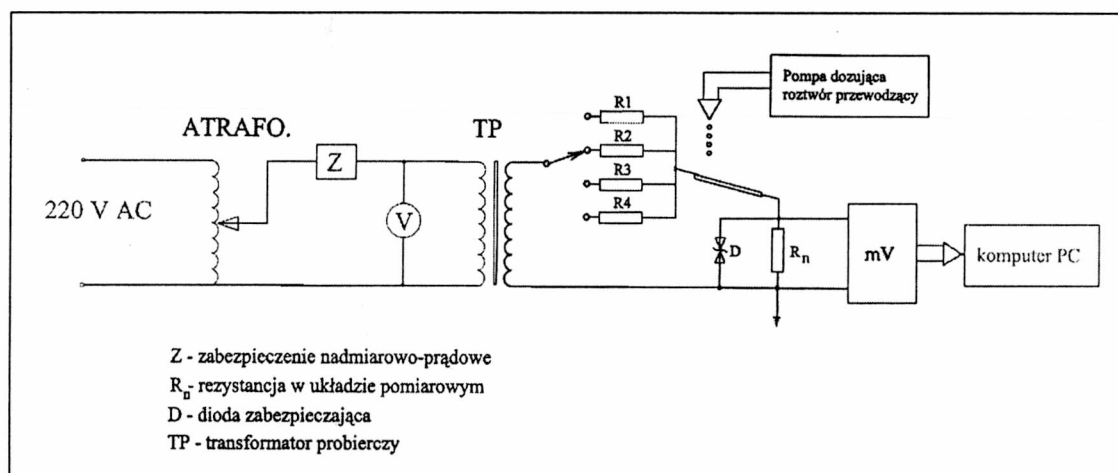
Rys. 6.5.5 Fragment krzywej napięcia wyładowania koronowego.

6.6. Zmodyfikowany test pochylej próbki

Przedmiotem badań były próbki elastomeru silikonowego HTV oraz pokrycie RTV o grubości 0,4 mm. Badania prowadzono na próbkach czystych oraz zabrudzanych kaolinem z solą. Szczegółowego opisu próbek dokonano w rozdziale 6.1. Sposób zabrudzania został

opisany w rozdziale 6.2. Eksperymentowi poddano również próbki, które wcześniej starzono w teście wyładowania koronowego.

Na rysunku 6.6.1 przedstawiono schemat układu do badania odporności materiałów elektroizolacyjnych na działanie prądów pełzających, które zostało opisane w normie [65] i



Rys. 6.6.1. Schemat układu pomiarowego [21].

przedstawione w pracy [21]. Stanowisko badawcze zostało zmodyfikowane tak aby roztwór elektrolitu był dozowany nie na dolną (wg normy) lecz na górną powierzchnie próbki nachyloną pod kątem 18° do płaszczyzny, który odpowiada w przybliżeniu spotykanym kątom nachylenia górnych powierzchni kloszy izolatorów. Według normy [65] próbka mocowana jest pod kątem 45° do płaszczyzny badaną powierzchnią skierowaną do dołu. Wodny roztwór chlorku amonu (wg normy) zastąpiono solanką o konduktywności $1,5 \text{ mS/cm}$, która nasączając odpowiednio zamocowane warstwy bibuły spływa po badanej powierzchni. Zastąpienie chlorku amonu przez solankę wynikało z potrzeby odniesienia przyjętej konduktywności solanki do konduktywności wodnych roztworów naturalnych zanieczyszczeń i umożliwiło porównanie wyników badań tą metoda z wynikami uzyskanymi z testu RWDT. Celem tej modyfikacji było odwzorowanie warunków eksploatacji górnych powierzchni kloszy izolatorów podczas występowania opadów atmosferycznych.

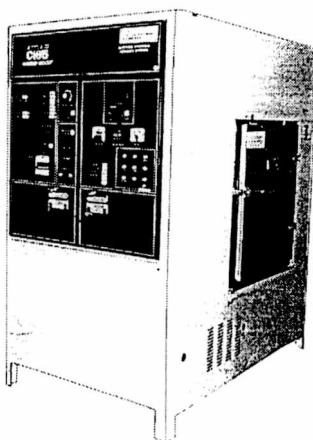
Urządzenie dozujące roztwór przewodzący, którym była solanka zapewniało jej wypływ w ilości 18 ml/godzinę . Przyjęte natężenie pola wynosiło $0,8 \text{ kV/cm}$. W czasie badań prowadzono stałą rejestrację prądu upływu. Głównym kryterium warunkującym przerwanie eksperymentu było zniszczenie próbki przez ślady głębokiej erozji lub osiągnięcie przez rejestrowany prąd wartości granicznej 60 mA [65], a więc takiej, przy której dalszy wzrost prądu mógłby spowodować przeskok powierzchniowy. Pomocniczym kryterium pozwalającym uznać materiał za dobry było wytrzymanie przez próbkę 6 godzin

bez osiągnięcia przez prąd wartości kryterialnej. Uzupełnieniem pomiarów prądu upływu były pomiary dynamicznych kątów zwilżania przed i po zakończeniu badań (rozdz.6.3).

Warunki narażania gum w tym teście łączą oddziaływanie napięcia z ciągłym przepływem elektrolitu zwykle w obecności zanieczyszczeń. Wydaje się, że są one zbliżone do występujących na górnych powierzchniach kloszy zwłaszcza w części izolatora sąsiadującej z przewodem wysokiego napięcia.

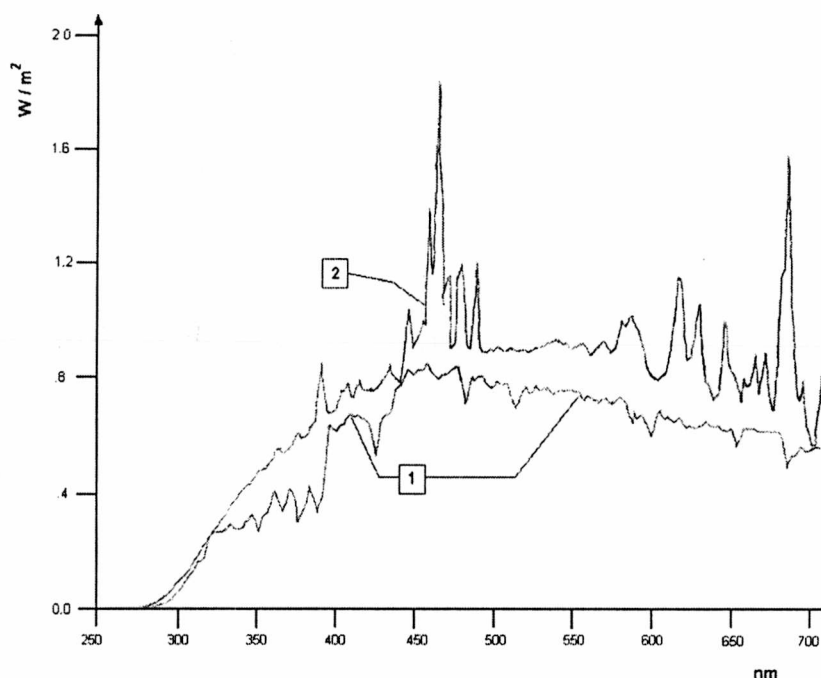
6.7. Test starzeniowy w komorze klimatycznej

Przedmiotem badań były próbki opisane w rozdziale 6.1. Przygotowano łącznie 36 próbek pokrycia RTV z czego jedna połowa na podłożu szklanym, a druga na podłożu z tworzywa. W każdej z tych 2 grup znajdowało się po 3 zestawy 6 próbek o jednakowej grubości. W przypadku próbek materiału HTV przygotowano po 5 sztuk obu grubości (3 i 5mm). Łącznie 10 sztuk.



Rys.6.7.1 Komora klimatyczna „ATLAS” [13].

Proces starzenia przeprowadzono w komorze klimatycznej przedstawionej na rysunku 6.7.1. Rozkład energii promieniowania lamp ksenonowych zastosowanych w komorze klimatycznej w funkcji długości fali przedstawiono na rysunku 6.7.2. Każdy cykl trwał dwie godziny, w czasie których przez 102 minuty próbki narażane były na działanie promieniowania ultrafioletowego a następnie przez 18 minut zraszane wodą destylowaną dejonizowaną. Źródłem promieniowania była lampka ksenonowa o mocy 6500 W wyposażona w borowokrzemowe filtry światła. Długość fal widma świetlnego zawierała się od 280 do 800 nm (rys. 6.7.2).



Rys. 6.7.2 Rozkłady energii promieniowania lamp ksenonowych (2) i światła słonecznego (1) w funkcji długości fali [13].

Średnio w roku, dobową długość nasłonecznienia wynosi około 4 godzin (rozdział 3). Obliczony czas naświetlania w komorze klimatycznej był około 6 razy dłuższy. Przy porównywalnej mocy promieniowania słonecznego i lampy ksenonowej (rysunek 6.7.2) można przyjąć, że próbki były sześciokrotnie bardziej narażane promieniowaniem UV w komorze klimatycznej w porównaniu do warunków eksploatacyjnych. Analogicznie, około 47% dni w roku to dni z opadami. Obliczony dobowy czas zraszania w komorze to około 3,6 godziny. Tak więc można przyjąć, że czas zraszania był co najmniej 2 razy dłuższy (bo w każdy dzień eksperymentu próbki były zraszane). Temperatura wewnątrz komory wynosiła $31,5 \pm 2^\circ\text{C}$, a wilgotność była utrzymywana na poziomie 55 %. Parametry te odpowiadają warunkom upalnej pory letniej i można przyjąć, że czas sprzyjający regeneracji hydrofobowości był około 3 razy dłuższy niż w warunkach eksploatacyjnych (rozdział 3).

Wszystkie próbki umieszczone były w stelażu w kształcie koła, który obracał się wokół lampy ksenonowej i zraszaczy. W połowie testu tj. po 1500 godzinach oraz po jego zakończeniu - po 3000 godzin dokonano pomiarów kątów zwilżania statycznych i dynamicznych.

Po zakończonym eksperymencie starzone próbki podzielono na 3 grupy. Pierwszą grupę stanowiły próbki czyste, drugą zabrudzono kaolinem z solą, a trzecią zabrudzono zanieczyszczeniem naturalnym. Metoda zabrudzania została opisana w rozdziale 6.2. Tak

przygotowane próbki umieszczono w piecu w temperaturze 40°C na czas 200 godzin. Dobór temperatury regeneracji podyktowany był temperaturami powierzchni izolatorów przy nasłonecznieniu w porze letniej w warunkach krajowych.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy (rozdział 4.2) ten typ narażeń jest dominujący zwłaszcza w części izolatora w otoczeniu jego uziemionego końca.

6.8. Test długotrwałego oddziaływania wody.

Obiektem badań były próbki opisane w rozdziale 6.1. Badaniom poddano pokrycie RTV na podłożu z tworzywa sztucznego. Przygotowano łącznie 9 próbek – po 3 sztuki o jednakowej grubości. Z gumy silikonowej HTV przygotowano dwie grupy po 3 próbki o grubościach elastomeru silikonowego odpowiednio 3 i 5 mm. Łączna ilość próbek przygotowanych do badań wynosiła 15.

Eksperyment polegał na procesie cyklicznego starzenia próbek w wodzie destylowanej w temp. 20°C a następnie odzyskiwaniu hydrofobowości przez leżakowanie w temperaturze 40°C. Taki dobór temperatury regeneracji spowodowany był przyjęciem temperatur powierzchni izolatorów podczas pory letniej w warunkach krajowych przy dużym nasłonecznieniu w zakresie 30-50°C.

Badania prowadzono według następującego porządku :

- cykl I - leżakowanie w wodzie destylowanej przez 100 godzin,
- odzyskiwanie właściwości hydrofobowych w temperaturze 40°C przez okres 200 godzin;
- cykl II-IV - leżakowanie w wodzie destylowanej przez 50 godzin,
- odzyskiwanie właściwości hydrofobowych w temperaturze 40°C przez okres 200 godzin.

Po każdym z etapów cyklu dokonywano pomiarów kątów zwilżania dynamicznych i statycznych. Metoda pomiaru została opisana w rozdziale 6.3. Po każdym cyklu leżakowania w wodzie przeprowadzano regenerację właściwości hydrofobowych elastomerów. Każdorazowo przed rozpoczęciem procesu regeneracji zabrudzano 5 sztuk próbek zabrudzeniem naturalnym, kolejne 5 próbek zabrudzano kaolinem z solą, a ostatnią grupę 5 próbek pozostawiono w stanie czystym. Metoda zabrudzania była taka sama jak w poprzednio opisanych eksperymentach (rozdział 6.2).

Metoda długotrwałego oddziaływania wody na gumę silikonową może mieć odniesienie do tych części powierzchni izolatora kompozytowego gdzie woda będąca wynikiem zawilgocenia, opadu lub kondensacji może utrzymywać się długotrwale.

7. Wyniki badań.

7.1. Analiza fizyko-chemiczna zabrudzeń wykorzystanych w eksperymentach badawczych.

W pracy wykorzystywano dwa rodzaje zabrudzeń:

- zabrudzenia naturalne, pochodzenia przemysłowego, które zostały zebrane z powierzchni izolatorów zainstalowanych w sąsiedztwie huty miedzi, na Terenowej Stacji Badań Zabrudzeniowych w Głogowie [9,71];
- zabrudzenie sztuczne składające się z mieszanki kaolinu z solą (NaCl) w proporcji wagowej 10:1 [61].

7.1.1. Struktura materiału

Standartową metodą wyznaczania struktury porowatej adsorbentów i katalizatorów jest pomiar izoterm sorpcji fizycznej gazu [32,56]. Najczęściej stosowanym adsorbentem jest N_2 , a pomiar wykonuje się w temperaturze ciekłego azotu ($-196^\circ C$). W niniejszej pracy pomiaru izoterm sorpcji (adsorpcji i desorpcji) N_2 dokonano metodą objętościową przy pomocy zautomatyzowanego aparatu Sorptomatic 1900 firmy FISNOS.

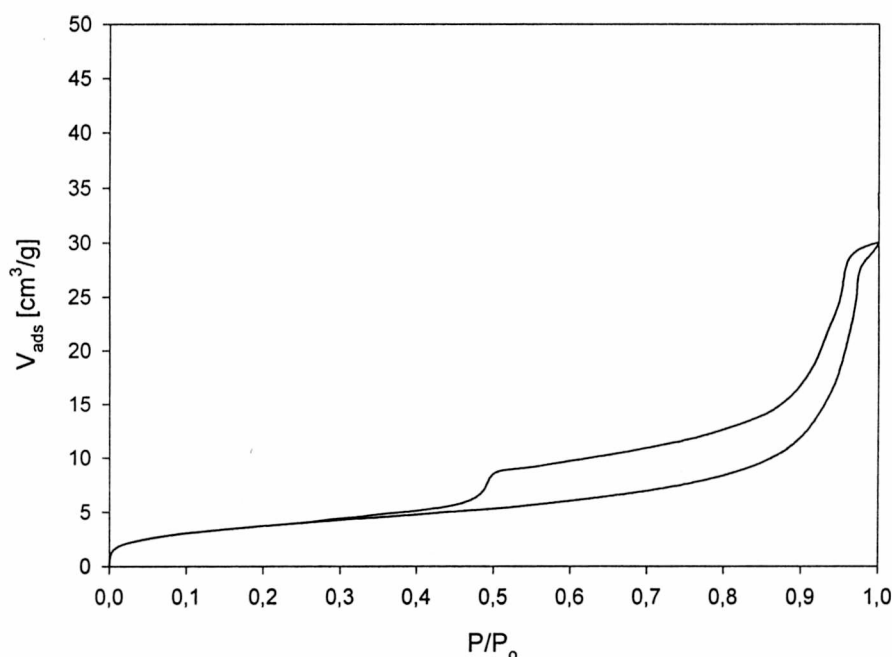
Próbkę adsorbenta wstępnie odgazowano pod próżnią (10^{-3} Torr) w biurecie pomiarowej w temperaturze $250^\circ C$ przez 5 godzin. Izotermę sorpcji N_2 zdejmowano według normy ASTM D4222-91 [14]. Z początkowej części izotermy, w zakresie ciśnień względnych $p/p_0 = 0,05 - 0,35$ (tj. stosunku ciśnienia równowagowego „p” do prężności pary nasyconej adsorbentu „ p_0 ”) wylicza się w oparciu o równanie BET (Brunauer- Emmet – Teller) powierzchnię właściwą adsorbenta S_{BET} [16]. Natomiast z gałęzi desorpcyjnej wyznacza się funkcję rozkładu wielkości porów $F(r) = \Delta V_p / \Delta r$ według metody BJH (Barreta, Joynera, Halenda) [3,17]. Wszystkie obliczenia wykonano za pomocą firmowego oprogramowania komputerowego Milestone-200. Średni promień porów wyliczono z prostej zależności $r_{sr} = 2 V_p / S_{BET}$, przy założeniu, że adsorbent zawiera pory jednorodne, mające kształt obustronnie otwartych cylindrów.

W tabeli 7.1.1 przedstawiono wyniki badań teksturalnych zabrudzenia naturalnego i sztucznego. Powierzchnia właściwa jak i objętość porów obu badanych zabrudzeń była na różna.

	Powierzchnia właściwa S_{BET} [m^2/g]	Objętość porów V_p [cm^3/g]
zabrudzenie naturalne	13,4	0,043
zabrudzenie sztuczne (kaolin +sól)	7,8	0,032

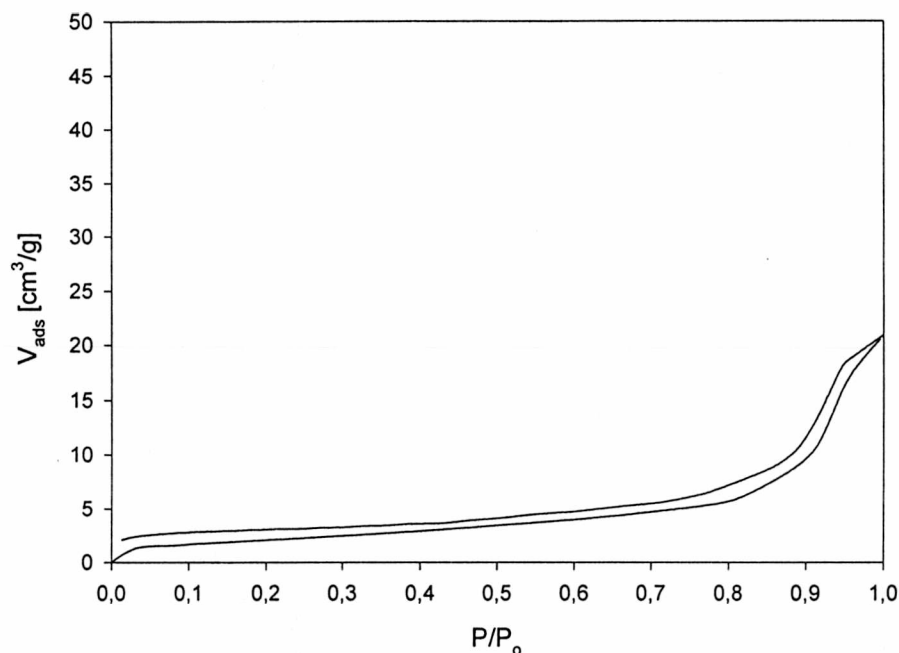
Tabela 7.1.1. Powierzchnia właściwa i objętość porów zabrudzenia sztucznego i naturalnego.

Na rys. 7.1.1 przedstawiono izotermę adsorpcji i desorpcji azotu przez próbkę zabrudzenia naturalnego. Kształt otrzymanej histerezy wskazuje, że zabrudzenie to jest materiałem mezoporowatym, dla którego wielkość najmniejszych por jest mniejsza od 100 Å.



Rys. 7.1.1. Zabrudzenie naturalne – izoterma adsorpcji i desorpcji.

Pory posiadają niejednorodną wielkość i kształt [56]. Im mniejsza jest wielkość por tym siły kapilarne materiału są większe. Sprzyja to do pewnego stopnia zjawisku „chłonięcia” przez zabrudzenie frakcji niskomolekularnych z podłoża tzn. z elastomeru silikonowego. W warunkach podwyższonej temperatury otoczenia oprócz opisanego zjawiska fizycznej adsorpcji występuje również zjawisko adsorpcji specyficznej tzw. chemisorpcji czyli tworzenia typowych wiązań chemicznych pomiędzy molekułami zabrudzenia i polimerem. Proces taki może intensyfikować hydrofobizację zabrudzeń znajdujących się na powierzchni gumy silikonowej.



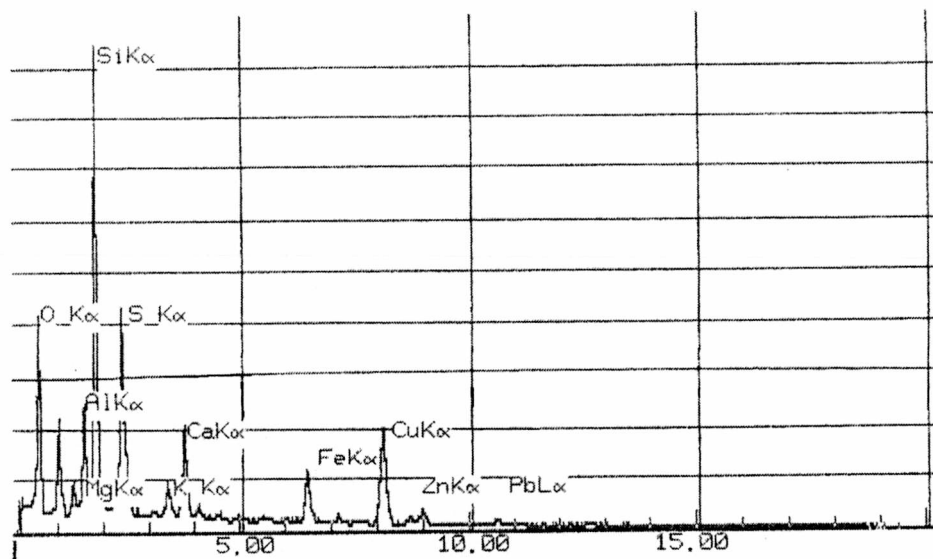
Rys. 7.1.2. Zabrudzenie sztuczne (kaolin z solą) – izoterma adsorpcji i desorpcji.

W przypadku zabrudzenia sztucznego – kaolinu z solą, izotermę sorpcji przedstawiono na rys. 7.1.2. Kształt otrzymanej histerezy również wskazuje, że zabrudzenie to jest materiałem mezoporowatym, dla którego wielkość najmniejszych porów wynosi około 500 Å. Spłaszczony kształt histerezy może świadczyć o niejednorodnej wielkości i kształtach porów. Analogicznie jak dla zabrudzenia naturalnego mogą tutaj występować zjawiska adsorpcji fizycznej i adsorpcji specyficznej (chemisorpcji). Z uwagi na większy rozmiar porów niż w przypadku zanieczyszczeń naturalnych kaolin będzie miał mniejszą zdolność chłonięcia frakcji niskomolekularnych.

7.1.2. Analiza chemiczna

Próbkę zabrudzenia naturalnego poddano badaniu składu chemicznego metodą EDS (Energy Dispersion Spectroskopy). Pomiar jakościowy wykonano za pomocą mikroskopu skaningowego firmy Philips SEM 515 wyposażonego w przystawkę do mikroanalizy rentgenowskiej. Pomiar polegał na rejestracji widma promieniowania R_{tg} emitowanego z próbki za pomocą analizatora energii z detektorem półprzewodnikowym Si (Li) trzymanym w temperaturze ciekłego azotu. Otrzymane spektrum energii po niezbędnych poprawkach korekcyjnych całkuje się a następnie oblicza się wartości liczbowe stężeń poszczególnych pierwiastków. Metoda korekcji ZAF (Z- liczba atomowa, A- adsorpcja, F- fluorescencja), którą zastosowano uwzględnia poprawki efektu różnicy

liczb atomowych, korekcje absorpcji promieniowania Rtg, i korektę efektów fluorescencji od promieniowania charakterystycznego i widma ciągłego Rtg.



Rys. 7.1.3. Widmo EDS – zawartość poszczególnych pierwiastków w próbce zanieczyszczenia naturalnego

Na rysunku 7.1.3 przedstawiono spektrum energii odpowiadające obecności poszczególnych pierwiastków w próbce zanieczyszczenia naturalnego. Największą część zanieczyszczenia – ponad 36% (procent atomowy) stanowił krzem, miedź – ponad 18%, siarka – ponad 12%, glin – 11%, wapń – ponad 7%, a także żelazo – 5%, magnez, ołów, cynk i potas – wszystkie na poziomie 2-3%. Duża zawartość metali oraz siarki potwierdza metalurgiczne pochodzenie zanieczyszczenia.

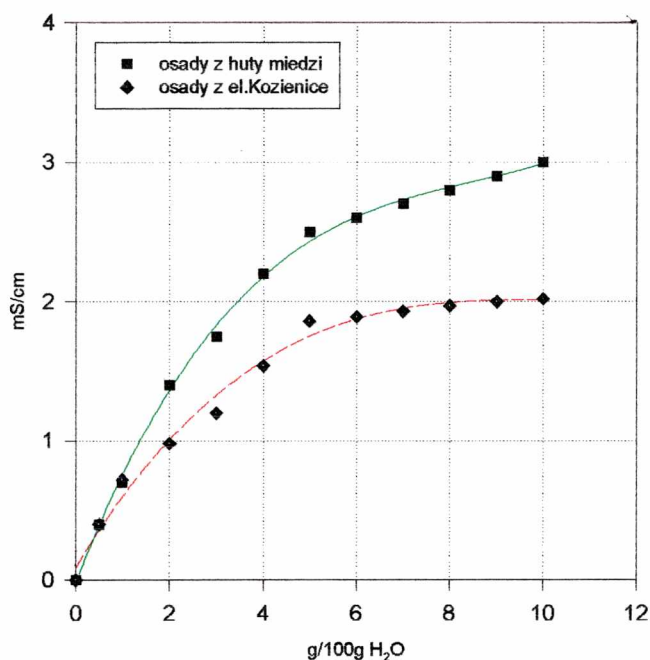
Kaolin jest produktem zwiętrzenia skał pierwotnych zawierających skały. W celu uzyskania materiału jednorodnego o małej wielkości cząstek kaolin poddaje się wzbogaceniu przez stopniowe osadzanie zawiesiny unoszonej przez strumień wody lub odsiewanie jego większych cząstek. Jego zasadniczym składnikiem jest kaolinit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [58]. Zgodnie z normą IEC 507 [67] skład wagowy kaolinu stosowanego w badaniach zanieczyszczeniowych izolatorów wysokonapięciowych powinien zawierać się w 40-50% z SiO_2 , 30-40% Al_2O_3 i około 7-14% H_2O .

7.1.3. Konduktywność zanieczyszczeń naturalnych.

Na rysunku 7.1.4 przedstawiono wykres zależności konduktywności wody domieszkowanej zanieczyszczeniami typu przemysłowego od ilości osadu rozpuszczonego w 100 gramach wody destylowanej. Konduktywność rozpuszczonych osadów pochodzących

z okolic huty miedzi osiąga maksymalnie około 3 mS/cm, podczas gdy dla osadów z okolic elektrowni w Koźlenicach około 2 mS/cm.

W przedstawionych eksperymentach konduktywność solanki przyjęto na poziomie 1,5 mS/cm kierując się wynikami konduktywności naturalnych osadów. Wartość ta znajduje się na liniowej części charakterystyk z rysunku 7.1.4 i jest bliska stanu nasycenia. Odpowiada to wartościom panującym na powierzchni silnie zabrudzonych izolatorów elektroenergetycznych.



Rys.7.1.4. Konduktywność wody domieszkowanej osadem zabrudzeniowym typu przemysłowego.

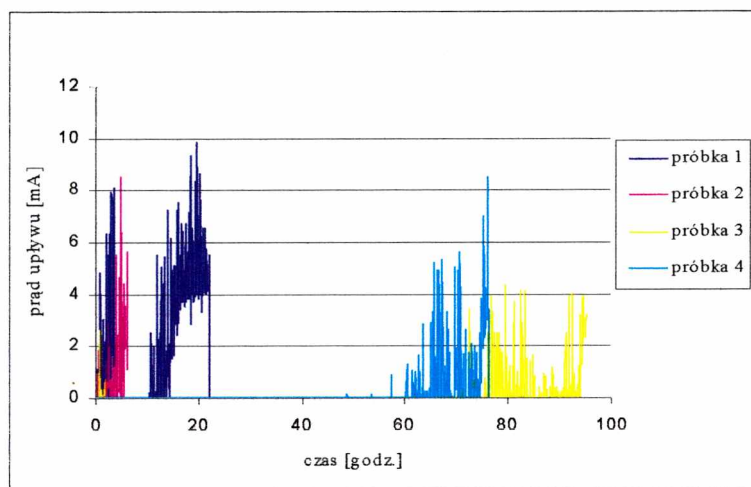
7.1.4. Podsumowanie.

- Porównanie izoterm adsorpcji i desorpcji obu zabrudzeń wskazuje, że w przypadku zabrudzenia naturalnego siły kapilarne są większe niż w przypadku kaolinu i dlatego zanieczyszczenie naturalne powinno intensywniej adsorbować frakcje niskomolekularne oleju silikonowego.
- Powierzchnia ziaren zanieczyszczeń naturalnych jest większa od powierzchni kaolinu co może mieć wpływ na ilość frakcji niskomolekularnej adsorbowanej na tej powierzchni.
- Zabrudzenie naturalne posiada dużą zawartość związków metali i siarki.
- Konduktywność naturalnych zanieczyszczeń typu przemysłowego w stanie nasycenia mieści się w zakresie 2-3 mS/cm. W dalszych badaniach przyjęto dlatego stosować konduktywność solanki rzędu 1,5 mS/cm.

7.2. Badania metodą RWDT.

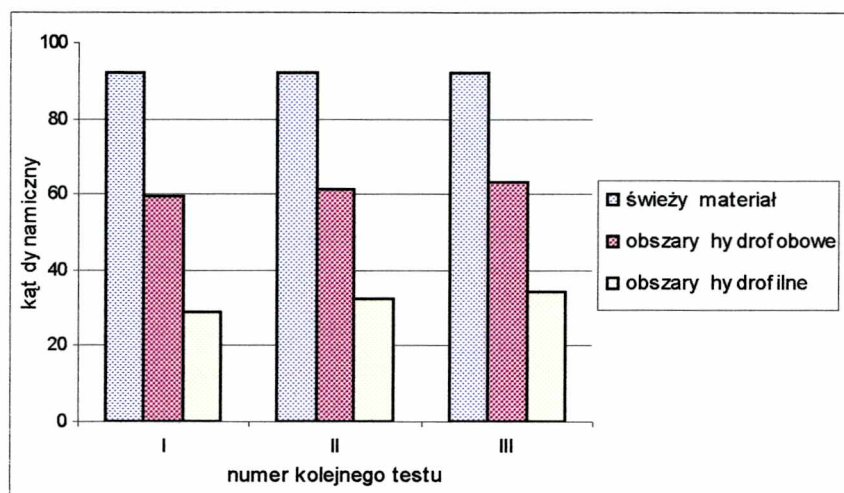
7.2.1. Wyniki badań materiału HTV.

Próbki wykorzystane w eksperymencie, ich parametry oraz sposób przygotowania zostały przedstawione w rozdziale 6. Przebadano łącznie 12 próbek z gumy HTV w trzech testach przy konduktywności 1,5 mS/cm i natężeniu pola elektrycznego 0,6 kV/cm [1,2,47]. Pierwszy zakończył się po około 38 godzinach to znaczy po czasie, po którym prąd upływu dla ostatniej próbki osiągnął i przekroczył trwale wartość 1 mA. Rejestrator cyfrowy rejestrował wartość najwyższego impulsu prądowego jaki wystąpił w czasie trwania fazy napięciowej. Prąd na próbkach materiału HTV narastał stopniowo, a pojedyncze impulsy prądowe wkrótce przestały zanikać powodując ciągły przepływ prądu upływu podczas kolejnych (dla danej próbki) faz napięciowych (rys.7.2.1).



Rys.7.2.1. Materiał HTV – wykres zależności prądu upływu od czasu starzenia

Następne dwa testy trwały odpowiednio po około 69 i 94 godzinach. Różnica czasu trwania wczesnego okresu starzenia (EAP) dla poszczególnych próbek była dość znaczna. W pierwszym teście wynosiła 29 godzin (pomiędzy pierwszą i ostatnią próbką materiału), w drugim około 40 godzin, a w trzecim prawie 90 godzin (rys. 7.2.1). Tak znaczne różnice czasu starzenia mogą wynikać z niejednorodności powierzchni badanego materiału. Zmierzone dynamiczne kąty zwilżania powierzchni materiału świeżego oscylowały na poziomie 90° (rys. 7.2.2).

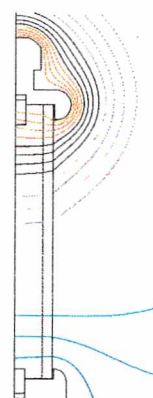


Rys. 7.2.2. Materiał HTV – wykres zmian zwilżalności.

Po starzeniu na badanych powierzchniach wyodrębniły się obszary hydrofilne i hydrofobowe. Średnie wartości kątów dynamicznych obszarów hydrofilnych utrzymywały się na poziomie 30 zaś hydrofobowych około 60°. Obszar hydrofilny przyjmował kształt wąskiej ścieżki rozszerzającej się w obszarze przyelektrodowym (rys. 7.2.3).



Rys. 7.2.3. Starzona próbka - obszar hydrofilny.



Rys. 7.2.4. Nierównomierność pola wzdłuż próbki.

Duże natężenie przy elektrodach powodowały zwiększoną aktywność wyładowań elektrycznych i tym samym zwiększoną zwilżalność gumy w tym obszarze (rys. 7.2.4). Można zwrócić uwagę, że wielkość obszarów hydrofilnych i hydrofobowych była porównywalna we wszystkich testach niezależnie od czasu ich trwania. Oznaczać to może, że w wyniku starzenia omawiana metodą następuje głównie degradacja gumy, która utraciła już niską zwilżalność. Nie zaobserwowano starzenia całej powierzchni próbki. Przy znanej szerokości ścieżki hydrofilnej oraz zmierzonej wartości prądu upływu można obliczyć przybliżoną grubość warstwy elektrolitu. Wartość prądu opisuje zależność (7.1) :

$$I_L = \sqrt{2} \frac{U}{d_c} \gamma h d \quad (7.1)$$

gdzie U – to napięcie przyłożone (6 kV); γ – konduktywność elektrolitu (1,5 mS/cm); d_c – długość drogi upływu (10 cm); h – grubość warstwy elektrolitu, d – szerokość ścieżki hydrofilnej (~0,2 cm).

Po przekształceniu –

$$h = \frac{I_L}{\sqrt{2} \cdot \frac{U}{d_c} \gamma \cdot d} \quad (7.2)$$

Obliczona grubość warstwy elektrolitu wynosiła około 40 μm i jest zbliżona do tej, która została podana w pracy [47]. O wzroście prądu upływu może więc decydować wzrost szerokości ścieżki hydrofilnej lub postępujący proces degradacji gumy w tym obszarze. Przy znanej grubości warstwy elektrolitu h oraz konduktywności γ można szacunkowo obliczyć konduktywność warstwy zabrudzeń κ wykorzystując zależność (7.3) :

$$\kappa = h \gamma \quad (7.3)$$

przy konduktywności elektrolitu 1,5 mS/cm -

$$\kappa = 40 [\mu\text{m}] 1,5 [\text{mS/cm}] = 6 \mu\text{S}$$

Przyjmuje się, że [4]

$$\kappa = 1500 \text{ SDD} \quad (7.4)$$

(SDD – gęstość osadu soli według IEC 507), z czego wynika że

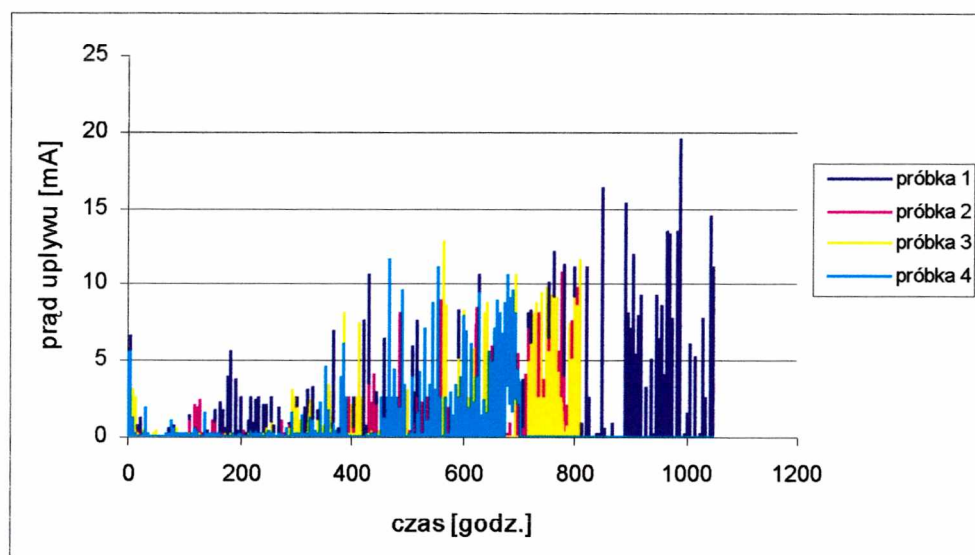
$$\text{SDD} = \kappa / 1500 = 6 / 1500 = \sim 0,004 \text{ mg/cm}^2.$$

Zgodnie z doniesieniami literaturowymi gęstość osadu soli na naturalnie zabrudzonych izolatorach w strefie silnego zbrudzenia zwykle nie przekracza 0,1 mg/cm² [20]. Tak więc można uznać, że głównym czynnikiem wpływającym na proces starzenia było oddziaływanie natężenie pola elektrycznego, którego wartość była o około 2-3 razy większa od wartości natężenia pola obliczonego dla izolatorów linii 110 kV i wynoszącego około 0,2 - 0,3 kV/cm (w stosunku do napięcia fazowego).

Należy zauważyć, że osiągnięcie przez prąd upływu wartości kryterialnej 1 mA nie pozwala jeszcze wnioskować o jakości gumy ponieważ kryterium ma charakter arbitralny i dopiero porównanie z wynikami innych badań pozwoli na lepszą ocenę gumy HTV.

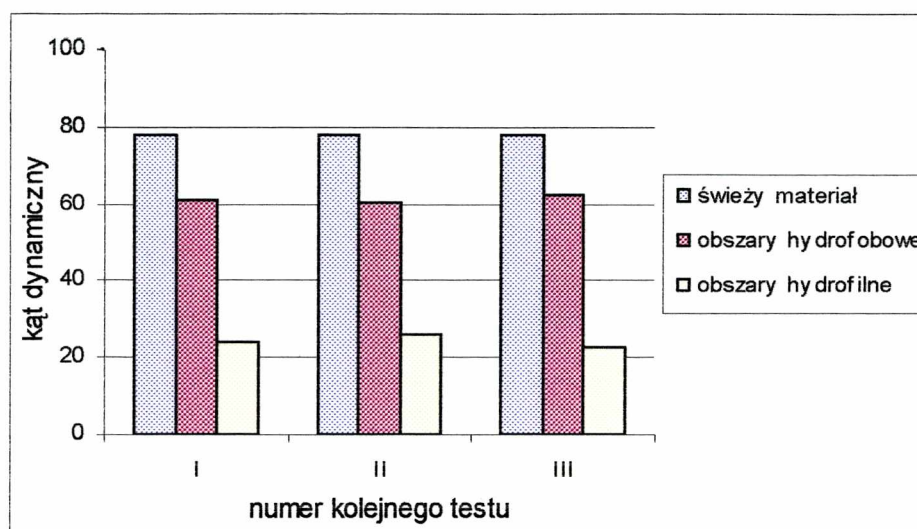
7.2.2. Wyniki badań pokrycia RTV.

W czterech kolejnych eksperymentach różniących się parametrami konduktywności roztworu soli i przyłożonego napięcia przebadano 20 próbek. Pierwszy przeprowadzono przy konduktywności roztworu soli wynoszącej 1,5 mS/cm i natężeniu pola 0,6 kV/cm. Test ten zakończył się po około 1050 godzinach kiedy prąd upływu na ostatniej próbce trwale przekroczył wartość 1 mA. Dla pierwszej próbki z tej serii nastąpiło to po około 700 godzinach (nr 4 - rys. 7.2.5). Jak już zaznaczono, rejestrator cyfrowy zapisywał wartość najwyższego impulsu prądowego jaki wystąpił w czasie trwania fazy napięciowej.



Rys. 7.2.5. Materiał RTV na podłożu ceramicznym – wykres zależności prądu upływu od czasu starzenia.

W celu zaostrożenia warunków próby następne testy przeprowadzono dwuetapowo zmieniając każdorazowo w drugim etapie parametry konduktywności i napięcia. W pierwszym etapie, który przerywano po około 200 godzinach parametry te zawsze wynosiły odpowiednio 0,6 kV/cm i 1,5 mS/cm. W drugim etapie testu drugiego (po 200 godzinach) podniesiono tylko poziom konduktywności elektrolitu z 1,5 do 2,5 mS/cm, a natężenie pola pozostawiono bez zmian tzn. 0,6 kV/cm. Podwyższenie konduktywności elektrolitu miało na celu podwyższenie konduktywności badanych powierzchni. Eksperyment ten został przerwany po około 330 godzinach. Prąd na żadnej próbce nie przekroczył 1 mA. Wyniki pomiarów dynamicznych kątów zwilżania wykonane po każdym z eksperymentów były zbieżne (rys. 7.2.6.).



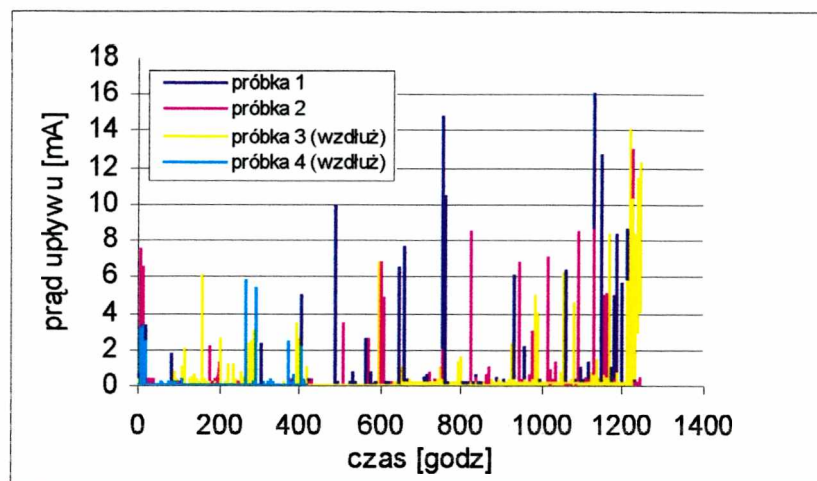
Rys.7.2.6. Pokrycie RTV – wykres zmian zwilżalności.

Analogia ta dotyczy również kształtu powierzchni hydrofobowych i hydrofilnych.

W kolejnym – trzecim eksperymencie (po 200 godzinach) podniesiono natężenie pola do 0,8 kV/cm. Podobnie jak we wcześniejszych eksperymentach zaobserwowano występowanie obszarów hydrofobowych i hydrofilnych w postaci wąskiej ścieżki rozszerzającej się przy elektrodach. Zmierzone dynamiczne kąty zwilżania wynosiły około 60 stopni dla obszarów hydrofobowych i 20 -25 stopni dla obszarów hydrofilnych. Po około 60 godzinach trwania II części testu jedna z próbek osiągnęła koniec okresu EAP tzn. wartość prądu upływu przekroczyła w sposób stały poziom 1 mA. Zmierzony końcowy poziom hydrofobowości próbek był tylko nieco niższy od poziomu zmierzonego po I etapie (po 200 godzinach).

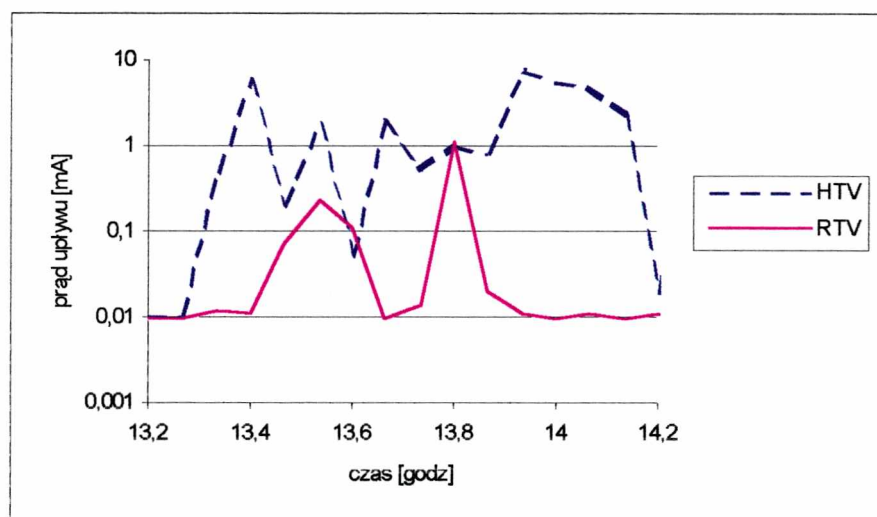
W celu oceny wpływu rodzaju podłoża na zmiany hydrofobowości badaniu poddano również próbki pokrycia RTV na podłożu z włókna szklanego i porównano wyniki z próbkami na podłożu ceramicznym. Istotne było również sprawdzenie adhezji pokrycia do dwóch typów podłoża o różnej zdolności odprowadzania ciepła. Dodatkowo część próbek powlekano w sposób klasyczny przy wykorzystaniu obracarki (w poprzek), a część powlekano nakładając pokrycie wzdłuż próbek. Eksperyment ten prowadzono nieprzerwanie przy jednakowej intensywności narażeń – natężeniu pola 0,6 kV/cm i konduktywności 1,5 mS/cm .

Nie zaobserwowano istotnego wpływu sposobu pokrywania próbek na czas trwania eksperymentu dla poszczególnych próbek (rys.7.2.7). Eksperyment przerwano po około 1250 godzinach. Po około 1210 godzinach prąd upływu przekroczył trwale wartość 1mA dla próbki powlekanej wzdłuż (nr 3 - rys.7.2.7).



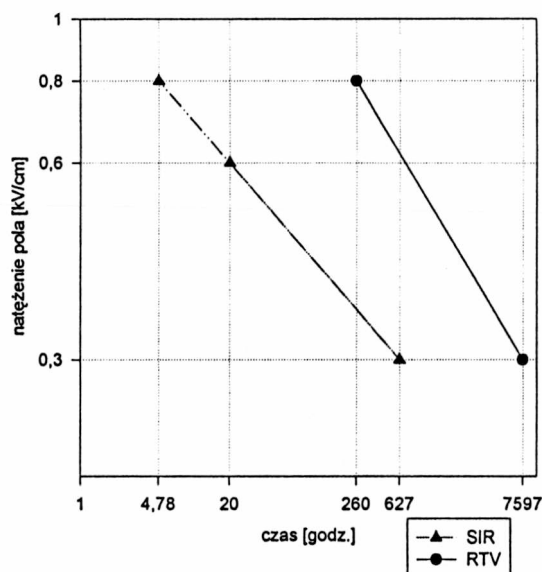
Rys. 7.2.7. Materiał RTV na podłożu z włókna szklanego – wykres zależności prądu upływu od czasu starzenia

Powtarzającym się zjawiskiem była wzmożona aktywność pojawiania się pojedynczych impulsów prądowych na początku każdego eksperymentu. Faza ta trwała od około 6-7 godzin do około 14. Po tym czasie częstotliwość jak również amplituda występujących wyładowań uległa wyraźnemu zmniejszeniu. Wartość średnia zarejestrowanego prądu była wyższa w przypadku materiału HTV co przedstawia rysunek 7.2.8. Podobnie tłumienie prądów było mniej efektywne na gumie HTV na co wskazuje porównanie kształtu rejestrowanych przebiegów prądowych. Jak wynika z rysunku 7.2.8 prąd na powierzchni gumy HTV miał tendencje do utrzymywania się na pewnym poziomie przez dłuższy okres czasu niż na powierzchni gumy RTV gdzie okresowo zanikał. Może to wskazywać, że kryterium wartości prądu 1 mA dla gumy HTV jest zbyt surowe.



Rys. 7.2.8. Porównawczy wykres zależności prądu upływu od czasu starzenia dla materiału HTV i pokrycia RTV.

W oparciu o otrzymane wyniki badań próbek RTV przygotowano wykres opisujący zależność czasu trwania testu od wartości przyłożonego napięcia przy stałej konduktywności elektrolitu wynoszącej 1,5 mS/cm (przebieg RTV-rys.7.2.9) [47].



Rys. 7.2.9. Wykres zależności natężenia pola elektrycznego od czasu trwania RWDT ($\gamma=1,5\text{mS/cm}$).

Wykres ten uwzględnia tylko te próbki, które osiągnęły koniec okresu wczesnego starzenia. Z powyższych danych wynika, że przy konduktywności elektrolitu 1,5 mS/cm czas trwania eksperymentu dla pokrycia RTV jest opisany funkcją:

$$T_1 = 120,76 E^{-3,44} \quad (7.5)$$

natomiast dla gumy SIR [47] –

$$T_2 = 1,5797 E^{-4,97} \quad (7.6)$$

gdzie E – natężenie pola [kV/cm]. Jak już zaznaczono w rozdziale 7.2.1 wartość natężenia pola obliczona dla izolatorów linii 110 kV jest rzędu 0,3 kV/cm. Podniesienie natężenia pola elektrycznego z 0,3 do 0,8 kV/cm (około 3-krotnie) w przypadku pokrycia RTV i materiału SIR opisanego w publikacji [47] spowodowało w przybliżeniu trzydziestokrotne przyspieszenie procesu starzenia pokrycia RTV i około sto trzydziestokrotne przyspieszenie starzenia materiału SIR. W przyjętej metodzie starzenia lepsze wyniki otrzymano dla próbek materiału RTV. Wynika stąd dalej, że skracanie drogi upływu izolatora związane ze wzrostem natężenia pola może powodować bardzo szybkie starzenie materiału osłonowego. Analogicznie jak dla materiału HTV- wykorzystując zależność (7.3) - obliczono szacunkowo konduktywność warstwy zanieczyszczeń, która przy konduktywności elektrolitu 2,5 mS/cm wynosiła :

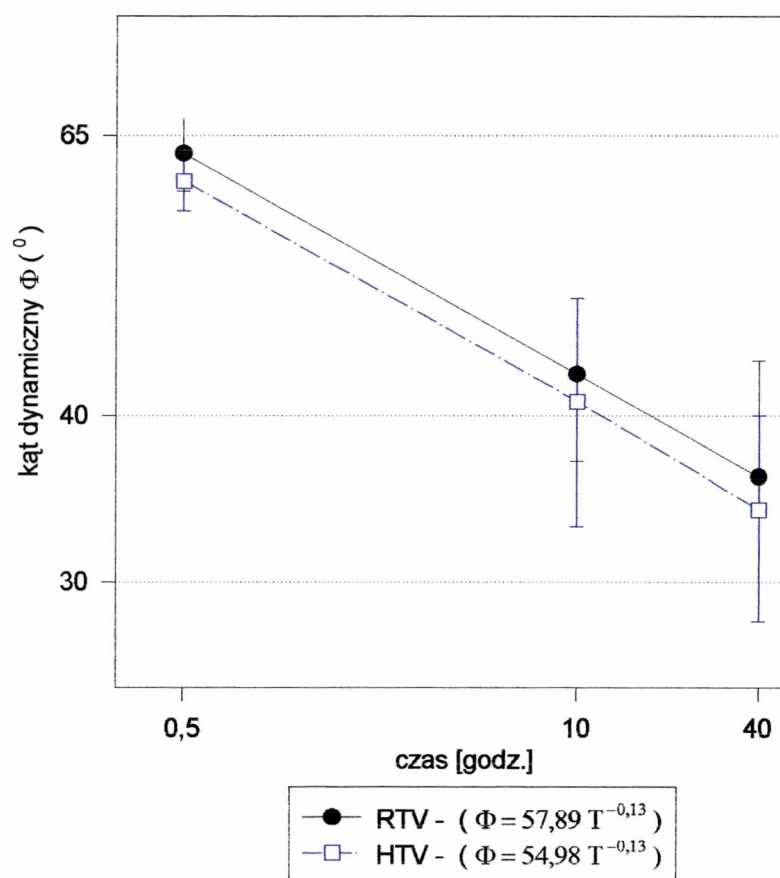
$$\kappa = h \gamma = 40 [\mu\text{m}] 2,5 [\text{mS/cm}] = 10 \mu\text{S}$$

oraz analogicznie gęstość osadu soli –

$$\text{SDD} = \kappa / 1500 = 10 / 1500 = \sim 0,007 \text{ mg/cm}^2$$

Obliczone wartości κ i SDD są w dalszym ciągu małe i stanowią słabe narażenie zabrudzeniowe badanych gum. Dlatego podobnie jak w przypadku materiału HTV tutaj również głównym czynnikiem wpływającym na proces starzenia było natężenie pola elektrycznego.

Na rysunku 7.2.10 przedstawiono wyniki badań gum silikonowych RTV i HTV na wykresach przy skalach logarytmicznych. Zależności matematyczne opisujące przedstawione przebiegi obliczono na podstawie średnich wartości zmierzonych parametrów. Pozwalają one na obliczenie przybliżonego stopnia zwilżania powierzchni po określonym czasie oddziaływania narażeń w teście RWDT.



Rys. 7.2.10. Utrata i odzysk hydrofobowości przez próbki materiału RTV i HTV w teście RWDT

7.2.3. Podsumowanie wyników.

Cechą wspólną obu badanych materiałów był kształt powierzchni hydrofobowych i hydrofilnych po zakończonych eksperymentach. Analogicznie dla obu materiałów obszary hydrofilne były większe przy elektrodzie górnej (napięciowej).

Wielogodzinne starzenie pokrycia RTV nie powodowało poza kilkoma tylko przypadkami pojawiania się ciągłego prądu upływu. Badany materiał wykazał dużą odporność na proces starzenia przyjętą metodą. Niezależnie od długości trwania testu koniec wczesnego okresu starzenia (EAP) następował zawsze przy zbliżonym stanie zwilżalności powierzchniowej ścieżki hydrofilnej co świadczy o istnieniu zależności pomiędzy poziomem hydrofobowości, a występowaniem prądu upływu. Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wynikami badań pokrycia RTV na podłożu z ceramiki i na podłożu z włókna szklanego. Podobnie nie zaobserwowano wpływu sposobu nakładania pokrycia –wzdłuż próbek lub w poprzek – na rozwój prądu upływu w eksperymencie.

Natomiast w odmienny sposób obie gumy silikonowe tłumili prąd upływu. Podczas gdy rejestrowany prąd na próbkach pokrycia RTV posiadał charakter pojedynczych impulsów prądowych to w przypadku próbek HTV miał charakter ciągły. Rozpiętość czasu trwania wczesnego okresu starzenia (EAP) dla materiału HTV może świadczyć o dużej niejednorodności materiału bądź też o występowaniu defektów na badanych powierzchniach, które były odpowiedzialne za szybki wzrost prądu.

Czynnikiem degradującym badane próbki było głównie natężenie pola elektrycznego i związany z nim prąd upływu. Skracanie drogi upływu izolatora kompozytowego będzie związane z istotnym przyspieszeniem procesu starzenia materiału osłonowego.

Wydaje się, że utrata hydrofobowości w teście RWDT może być porównywana do utraty hydrofobowości na odcinkach pni izolatora kompozytowego. Stwierdzono bowiem, że prądy upływu nawet po wieloletniej eksploatacji izolatora po jego zawilgoceniu rzadko przekraczają wartość 1 mA, a sposób narażenia pnia jest zbliżony.

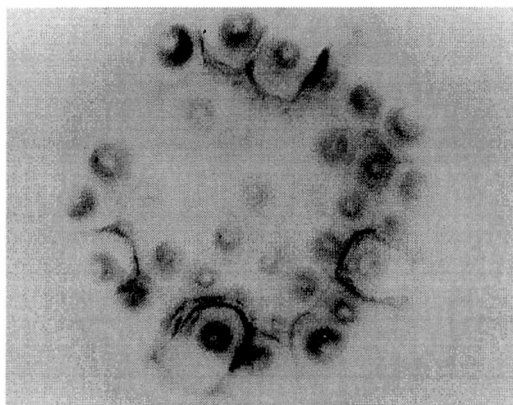
Wyniki badań przedstawione w tym rozdziale uzyskano we współpracy z Chalmers University of Technology i zreferowano na konferencji międzynarodowej [100].

7.3. Wpływ oddziaływania wyładowania koronowego.

7.3.1. Wyniki badań.

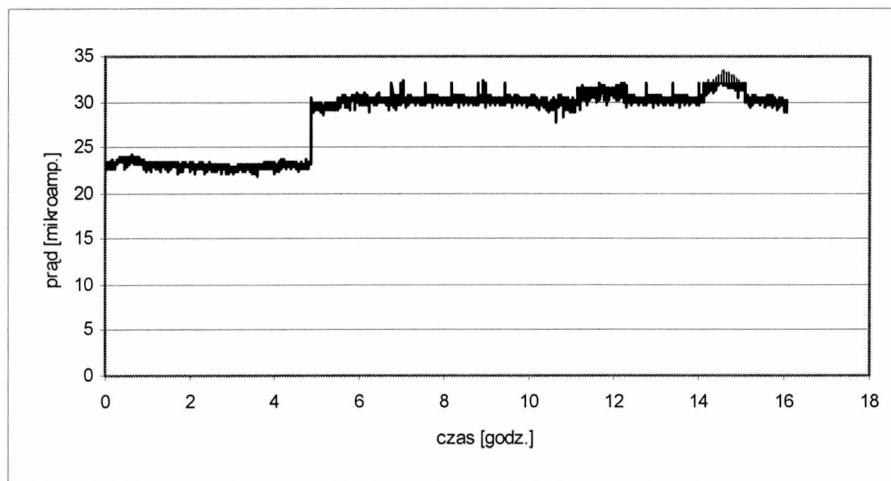
Badaniom poddano czyste oraz pokryte zabrudzeniem naturalnym lub sztucznym próbki elastomeru HTV i pokrycia RTV. Parametry próbek oraz metoda zabrudzania i pomiaru kątów zwilżania zostały opisane w rozdziale 6. Z każdej grupy próbek przebadano nie mniej niż po 3 sztuki.

Na rys. 7.3.1 przedstawiono fragment powierzchni próbki pod elektrodą po starzeniu wyładowaniem koronowym. Natężenie pola elektrycznego jest największe na ostrzach elektrody, na jej obrzeżu i dlatego degradacja powierzchni gumy jest największa pod tymi ostrzami. Wynika stąd dalej, że oddziaływanie wyładowań koronowych ma charakter lokalny i dotyczy powierzchni bezpośrednio narażanych, a tym samym może mieć niewielki wpływ na stan zwilżalności całego izolatora.



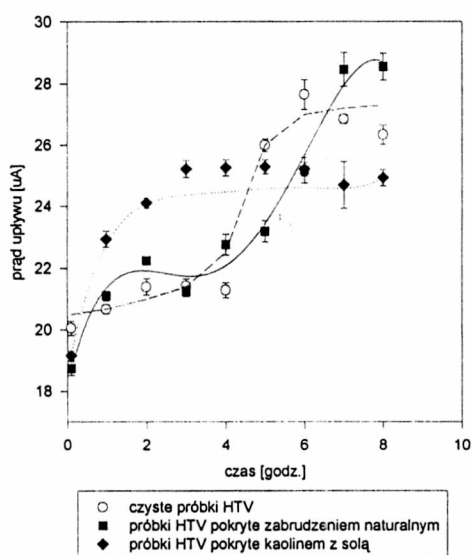
Rys. 7.3.1. Oddziaływanie wyładowania koronowego na elastomer silikonowy.

Na rys. 7.3.2 przedstawiono przebieg zmian prądu upływu w czasie starzenia ulotem czystego pokrycia RTV.

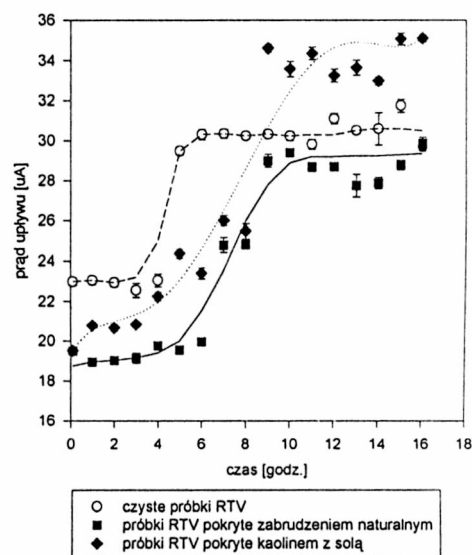


Rys. 7.3.2. Przebieg zmian prądu upływu w czasie starzenia ulotem czystego pokrycia RTV.

Po około 4-6 godzinach starzenia rejestrowano wzrost prądu początkowego o około 6-8 μA , którego przyczyną była zmiana kształtu menisku lustra wody z wypukłego na wklęsły. Zmiana ta była spowodowana degradacją materiału tzn. wzrostem zwilżalności a ułatwiał ją nadmuch powietrza wymuszony przez wentylator, który powodował napływ wody. Maksymalne wartości – pod koniec każdego etapu starzenia - utrzymywały się na poziomie około 30-34 μA (rys. 7.3.3 i 7.3.4). Analiza porównawcza zarejestrowanych prądów wyładowania koronowego wykazuje pewne uporządkowanie. Prąd początkowy był zawsze wyższy dla próbek czystych – z materiału HTV jak i RTV - (rys. 7.3.2) i wynosił około 20-22 μA gdy tymczasem dla próbek zabrudzonych nie przekraczał 20 μA (rys. 7.3.3 i 7.3.4).



Rys. 7.3.3. Wykres zmian prądu upływu od czasu starzenia – materiał HTV.

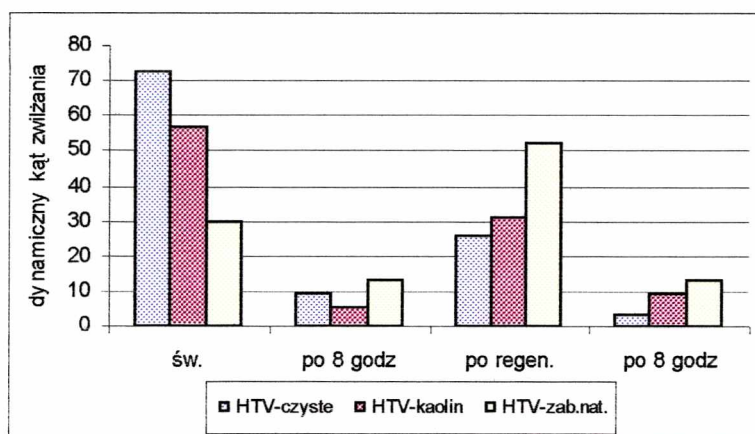


Rys. 7.3.4. Wykres zmian prądu upływu od czasu starzenia – materiał RTV.

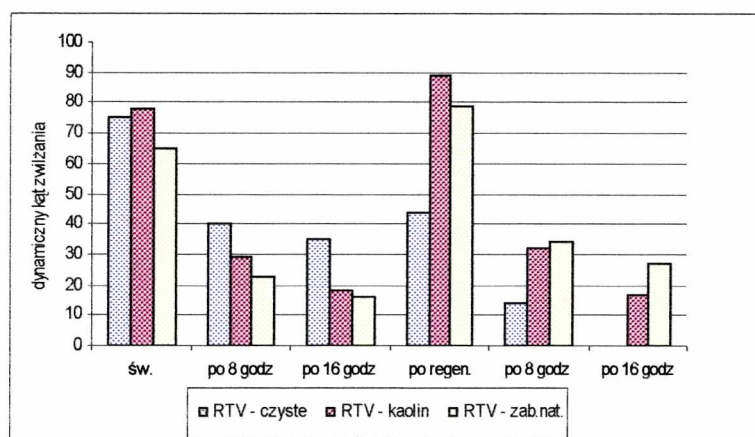
Zbiornicze wykresy prądów na rys. 7.3.3 i 7.3.4 ze wszystkich wykonanych eksperymentów pokazują, że materiał HTV i RTV zachowują się inaczej w stanie czystym i zabrudzonym, co można przypisać większej zdolności gumy RTV do hydrofobizacji zabrudzeń. Obecność słabo shydrofobizowanej warstwy zanieczyszczenia sztucznego – kaolinu z solą na powierzchni elastomeru HTV oraz duża higroskopijność soli mogły być przyczyną szybkiego nawilgacania badanych powierzchni co sprzyjało szybkiemu wzrostowi prądu upływu (rys. 7.3.3). Zmierzone średnie wartości dynamicznych kątów zwilżania dla czystych i zabrudzonych próbek elastomeru HTV po około 8 godzinach starzenia oscylowały na poziomie 10° . Po 200 godzinnej regeneracji w temperaturze 40°C uwidocznił się wyraźny wpływ obecności i rodzaju zabrudzeń na wzrost poziomu hydrofobowości podczas gdy próbki czyste pozostały zwilżalne. Kąty dynamiczne dla

próbek HTV pokrytych zabrudzeniem naturalnym wahały się od około 43 do 52° (rys.7.3.5). Efektywność regeneracji była wyższa dla materiału cieńszego o grubości 3 mm. W przypadku próbek czystych, po regeneracji kąty dynamiczne nie przekraczały odpowiednio 25° i około 16° (dla grubości 5 mm). Przy zabrudzeniu kaolinem z solą kąty te wynosiły przy obu grubościach około 30°. Wynika stąd, że badany materiał zachował niewielką zdolność regeneracji hydrofobowości po starzeniu wyładowaniem koronowym tylko w obecności zanieczyszczenia naturalnego co może mieć związek z właściwościami fizyko-chemicznymi tego zabrudzenia opisanymi w rozdziale 7.1.

Starzenie próbek RTV wyładowaniem koronowym spowodowało mniejszy wzrost zwilżalności w stosunku do materiału HTV (rys. 7.3.5 i 7.3.6) nawet po 16 godzinach starzenia. Największa dynamika zmian zwilżalności występowała podczas pierwszych 6-8 godzin starzenia zwłaszcza na próbkach czystych. Porównując wyniki pomiarów dynamicznych kątów zwilżania obu badanych materiałów znacznie lepszym okazał się elastomer RTV.



Rys. 7.3.5. Utrata i odzysk hydrofobowości przez próbki materiału HTV (o grubości 3mm) w teście wyładowania koronowego.



Rys. 7.3.6. Utrata i odzysk hydrofobowości przez próbki materiału RTV w teście wyładowania koronowego.

Po 8 godzinach starzenia dynamiczne kąty zwilżania oscylowały na poziomie 40° na próbkach czystych i 22° na zabrudzonych kaolinem z solą gdy tymczasem dla wszystkich próbek materiału HTV oscylowały na poziomie 10° . Regeneracja w temperaturze 40°C przez 200 godzin również wykazała lepsze właściwości pokrycia RTV – zmierzone kąty zwilżania przekraczały 40° na próbkach czystych i wahały się na poziomie 80° na zabrudzonych.

Można zwrócić uwagę, że brak powierzchniowych zanieczyszczeń na próbkach RTV podobnie jak w przypadku próbek gum HTV spowodował ich niezdolność do regeneracji hydrofobowości.

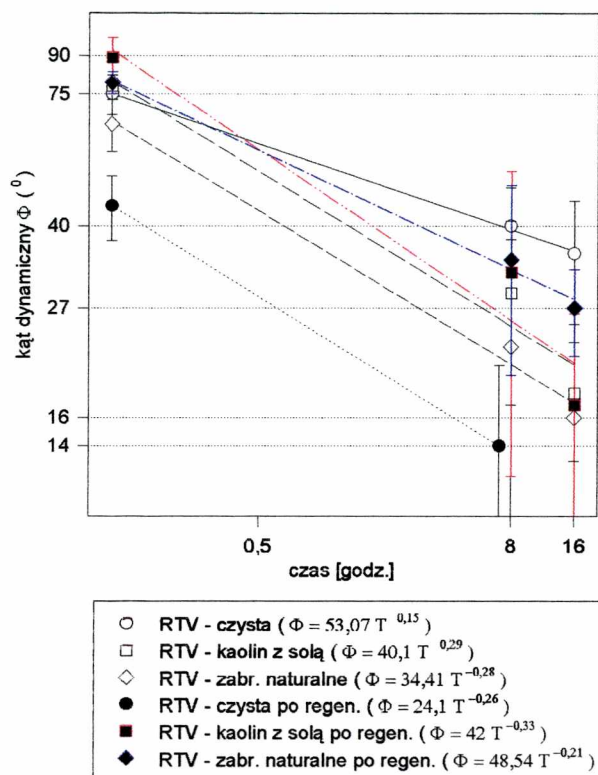
Może to wynikać z dekompozycji powierzchni według reakcji chemicznej przedstawionej na rys. 3.1.7 – rozdział 3.1.4. Pod wpływem wyładowania koronowego wydziela się ozon, który przyłączając wodór z grupy metylowej powoduje jej dekompozycję. Powstała w ten sposób grupa wodorotlenowa jest przyłączana do grupy CH_2 [39]. Zmiany te powodują wzrost zwilżalności powierzchni.

Jeżeli pękanie hydrofilnej warstwy SiOx będącej skutkiem oddziaływania wyładowania koronowego na powierzchnię gumy jest warunkiem regeneracji hydrofobowości to obecność warstwy powierzchniowej może przyspieszyć efektywność dyfuzji frakcji niskomolekularnej szczególnie tam gdzie te pęknięcia występują (różnica współczynników dyfuzji). Wydaje się, że obecność powierzchniowych zanieczyszczeń może również ograniczać lokalne niszczące działanie wyładowań koronowych na materiał co już stwierdzono w przypadku promieniowania UV [35]. Pomimo utraty hydrofobowości przez próbki z badanych gum nie stwierdzono samoistnego napływania wody na ich powierzchnie.

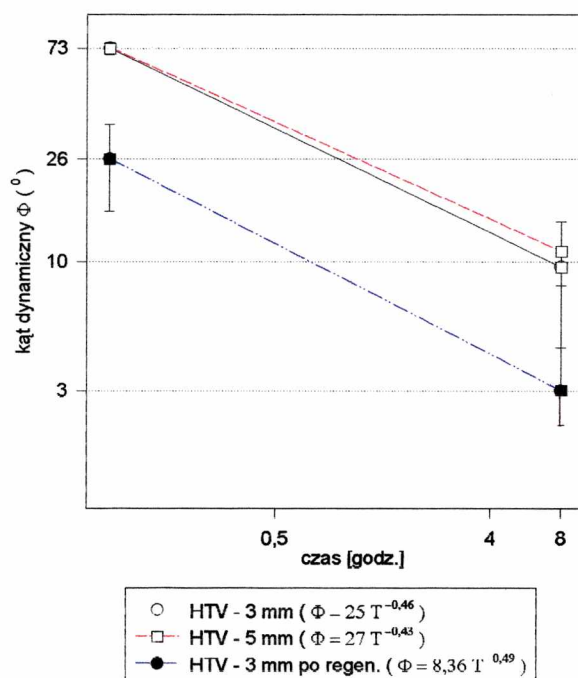
Nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy wynikami badań pokrycia RTV na podłożu szklanym i na podłożu z tworzywa sztucznego, a także zjawiska samoistnego napływania wody na badane próbki jak to zostało przedstawione w pracy [23]. Prawdopodobnie wyniki tam opisane uzyskano w warunkach silnego zerodowania powierzchni gum.

Na rysunkach 7.3.7 -7.3.10 przedstawiono zbiorcze wyniki badań gum silikonowych na wykresach przy skalach logarytmicznych. Zależności matematyczne opisujące przedstawione przebiegi obliczono na podstawie średnich wartości zmierzonych parametrów. Pozwalają one na obliczenie przybliżonego stopnia zwilżania powierzchni po określonym czasie oddziaływania wyładowania koronowego przy natężeniu pola wynoszącym $\sim 25 \text{ kV/cm}$. Przedstawione warianty uwzględniają dwa typy elastomerów

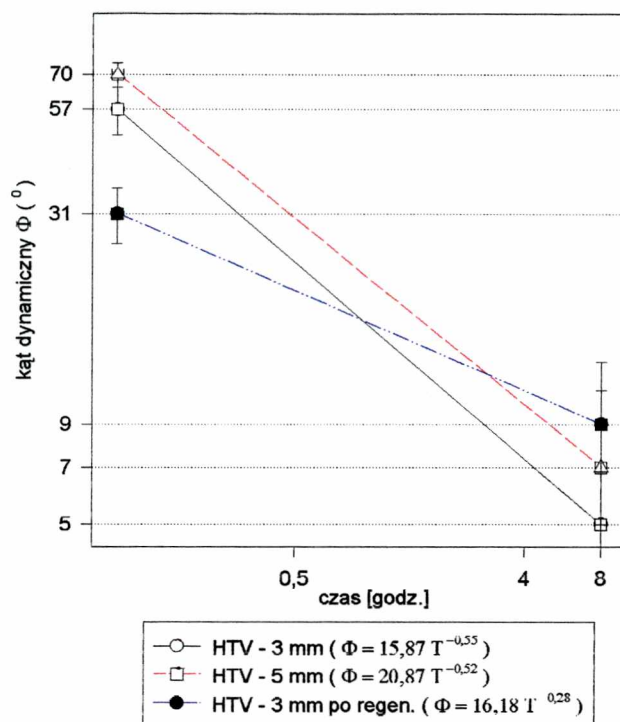
silikonowych oraz obecność zabrudzenia na ich powierzchniach – sztucznego (kaolin z solą) lub naturalnego jak również wariant gdy narażana powierzchnia jest czysta.



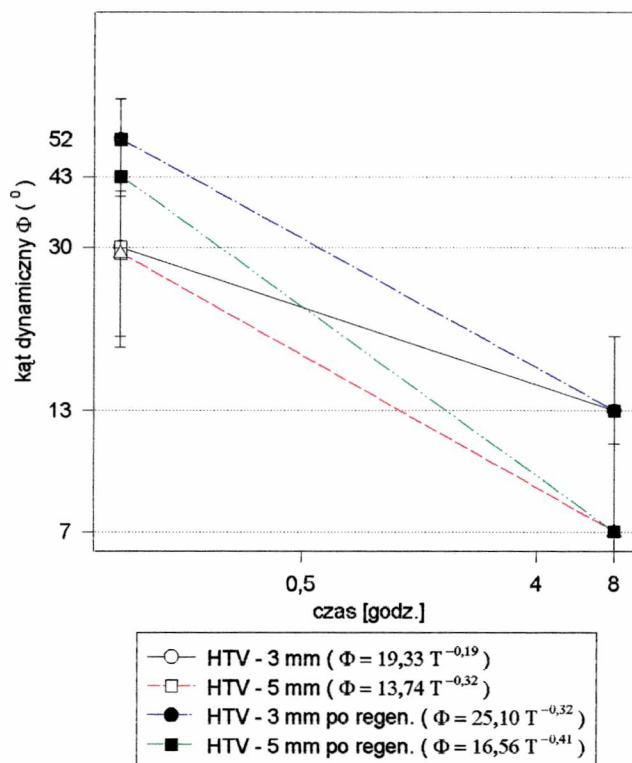
Rys. 7.3.7. Utrata i odzysk hydrofobowości przez próbki materiału RTV.



Rys. 7.3.8. Utrata i odzysk hydrofobowości przez czyste próbki materiału HTV.



Rys. 7.3.9. Utrata i odzysk hydrofobowości przez pokryte kaolinem próbki materiału HTV.



Rys. 7.3.10 Utrata i odzysk hydrofobowości przez pokryte zabrudzeniem naturalnym próbki materiału HTV

7.3.2. Podsumowanie wyników.

Starzenie czystych gum RTV i HTV wyładowaniem koronowym spowodowało utratę hydrofobowości ich powierzchni, której nie udało się zregenerować przyjętą metodą. Zasadniczy wniosek jaki wynika ze zbiorczych wykresów (rysunki 7.3.7 – 7.3.10) to praktyczny brak zdolności materiału HTV do regeneracji właściwości hydrofobowych po starzeniu wyładowaniem koronowym. Oznaczać to może pełną zwilżalność tych elementów izolatora kompozytowego, które znajdują się w otoczeniu „gorącego” końca. Z uwagi na ekranowanie powierzchni gumy silikonowej starzonej ulotem przez zabrudzenia ich zwiększona akumulacja w otoczeniu gorącego końca izolatora kompozytowego nie jest czynnikiem jednoznacznie negatywnym. Może się przyczynić do spowolnienia erozji gumy w tym miejscu.

Wyraźnie lepsze właściwości gumy RTV badanej w porównywalnych warunkach mogą wskazywać na jej przydatność nie tylko jako pokrycia hydrofobowego izolatorów tradycyjnych ale także do miejscowej regeneracji osłon izolatorów kompozytowych oraz do pokrycia pnia izolatora hybrydowego [88,89].

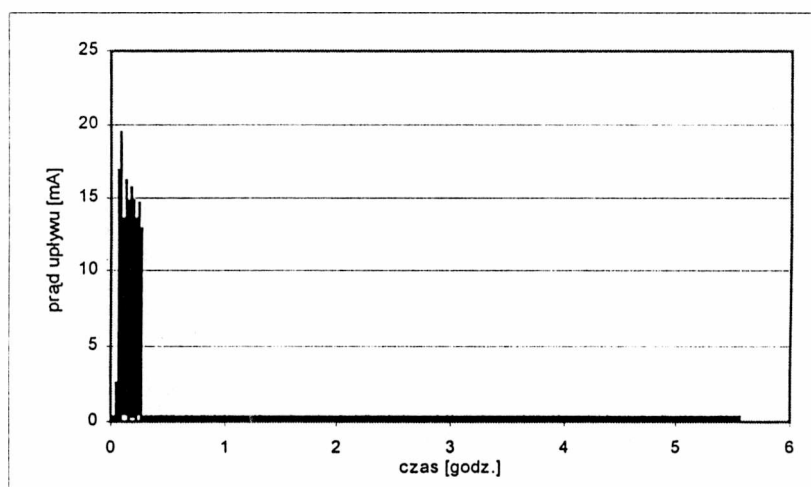
Stwierdzono równocześnie istnienie dobrej korelacji pomiędzy mierzonymi wartościami prądu upływu i stanem zwilżalności próbek z gum silikonowych. Zmiana menisku z wypukłego na wklęsły związana ze starzeniem wyładowaniem koronowym w obecności wody może ułatwić nawilgacanie słabo schydrofobizowanych zanieczyszczeń na powierzchni próbki HTV, zwłaszcza w przypadku wymuszonego nadmuchem napływu wody. Pomimo utraty hydrofobowości przez próbki z gum RTV i HTV nie zaobserwowano samoistnego napływu wody na ich powierzchnie.

7.4. Zmodyfikowany test pochylej próbki.

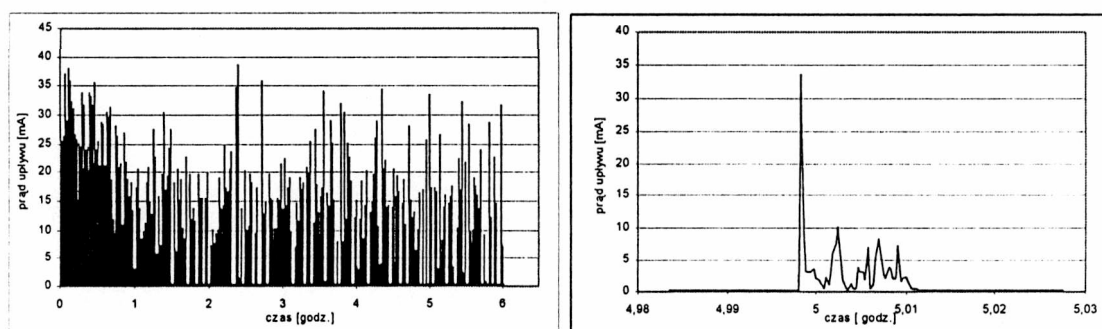
7.4.1. Wyniki badań.

Podobnie jak we wcześniej opisywanych eksperymentach badaniom poddano próbki elastomerów silikonowych HTV i RTV. Przygotowano próbki czyste oraz zabrudzone zanieczyszczeniem naturalnym (pył metalurgiczny) lub sztucznym – kaolinem z solą. Metoda zabrudzania oraz parametry próbek zostały opisane w rozdziale 6. Dodatkowo badaniom poddano próbki starzone w teście wyładowania koronowego. Miało to na celu zbadanie odporności obu gum silikonowych na erozję spowodowaną warunkami testu pochylej próbki przy obniżonym stanie hydrofobowości oraz przy przepływie prądu i

intensywnych wyładowaniach elektrycznych łuków cząstkowych. Takie warunki występują w pobliżu okuć izolatora, a odporność materiału osłonowego na erozję może decydować o szczelności izolatora i jego trwałości eksploatacyjnej. Analiza zarejestrowanych przebiegów zmian prądu na świeżych, czystych próbkach materiału HTV i RTV pokazała, że zmodyfikowana metoda pochyłej próbki nie wymaga specjalnego przygotowania powierzchni badanych materiałów i pozwala na ich okresowe zwilżanie. Na rysunkach 7.4.1 i 7.4.2 przedstawiono rejestracje prądów upływu w próbie klasycznej i zmodyfikowanej. Biorąc pod uwagę średnie wartości impulsów prądu upływu w czasie 6 godzin można przyjąć, że zmodyfikowany test około 3-krotnie silniej narażał badane próbki w stosunku do testu klasycznego.

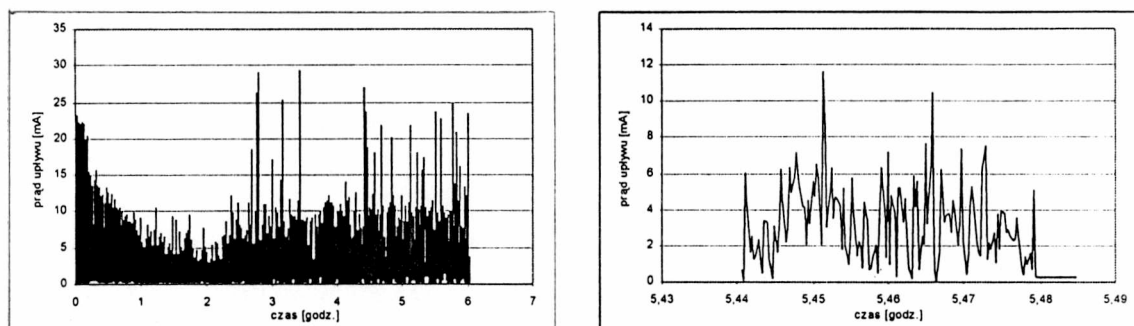


Rys. 7.4.1. Wykresy zależności prądu upływu od czasu starzenia czystych świeżych próbek RTV – próba klasyczna wg [65].



Rys. 7.4.2. Wykresy zależności prądu upływu od czasu starzenia czystych świeżych próbek RTV (próba zmodyfikowana) – cały przebieg oraz fragment około 3 minut pomiarów.

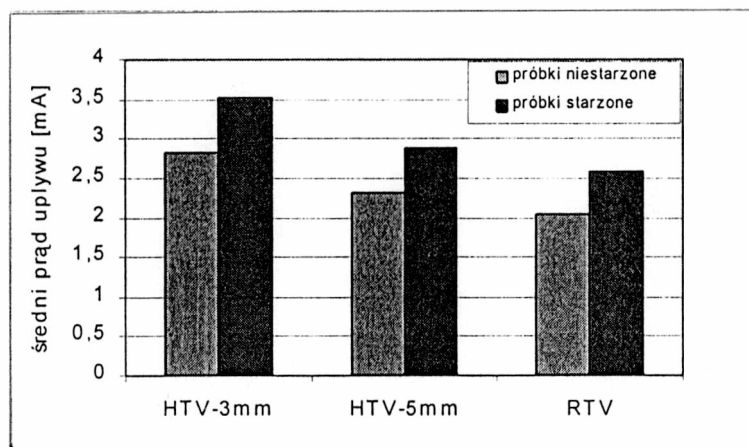
Przebieg rejestrowanego prądu jest różny na próbkach RTV (rys.7.4.2) i HTV (rys. 7.4.3) ponieważ w pierwszym przypadku ma charakter osobno występujących impulsów prądowych o różnej amplitudzie, które zanikają niemal do zerowej wartości, natomiast w przypadku materiału HTV zapłon impulsu powoduje okresowy przepływ prądu, który nie



Rys. 7.4.3. Wykresy zależności prądu upływu od czasu starzenia czystych świeżych próbek HTV (próba zmodyfikowana) – cały przebieg oraz fragment około 3 minut pomiarów.

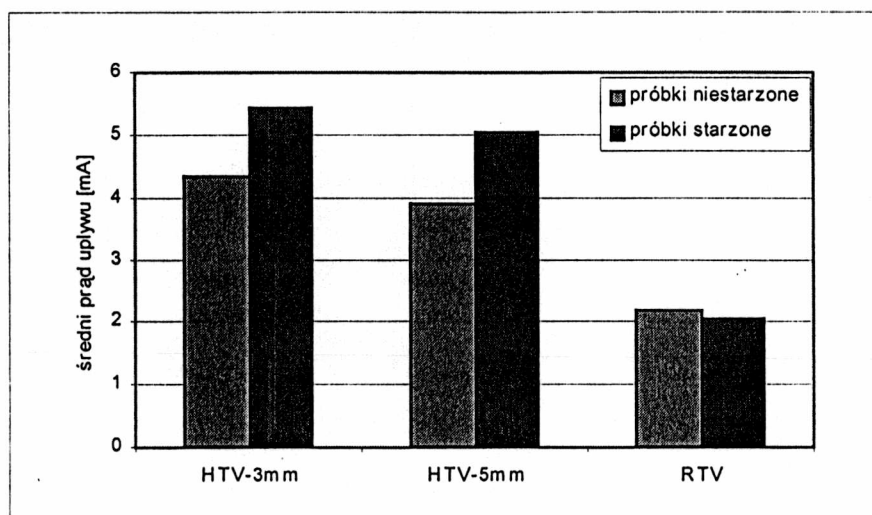
zanika i ma tendencje narastającą. Wynika stąd, że istnieje korelacja przebiegów prądowych z testem RWDT ponieważ i tutaj prąd na próbkach HTV był słabo tłumiony i miał tendencję do przechodzenia w przebieg ciągły. Wskazuje to na różnicę zachowań obu badanych materiałów stwierdzoną w dwóch niezależnych testach. Jednocześnie może to wskazywać, że przyjęte w teście RWDT kryterium prądowe 1 mA może być dla gumy HTV zbyt ostre.

W przypadku badanych próbek maksymalne wartości impulsów prądowych nie przekraczały zwykle 50-55 mA. Obliczone średnie wartości impulsów prądowych w ciągu 6 godzin trwania eksperymentu były wyższe dla materiału starzonego wcześniej oddziaływaniem wyładowania koronowego (rys.7.4.4 i 7.4.5). Tendencja to dotyczyła zarówno próbek czystych jak i zabrudzonych kaolinem z solą.



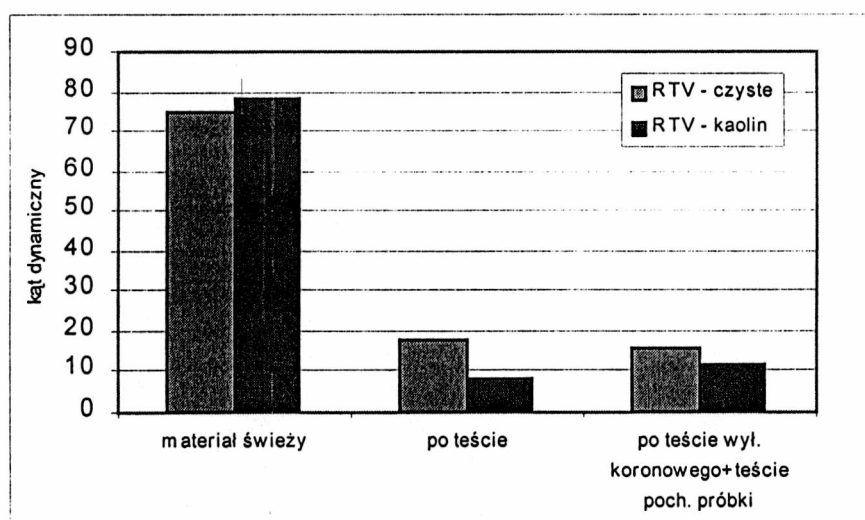
Rys. 7.4.4. Średnia wartość impulsów prądu upływu w okresie 6 godzin dla próbek czystych starzonych i nie starzonych wyładowaniem koronowym.

Średnie wartości impulsów prądu upływu w przypadku starzonego wyładowaniem koronowym pokrycia RTV były o około 20% większe od rejestrowanych na próbkach świeżych (rysunek 7.4.4). Natomiast zabrudzenie próbek RTV kaolinem wpłynęło na obniżenie średnich wartości impulsów prądu upływu na próbkach starzonych co przedstawiono na rysunku 7.4.5.



Rys. 7.4.5. Średnia wartość impulsów prądu upływu w okresie 6 godzin dla próbek zabrudzonych kaolinem z solą starzonych i nie starzonych wyładowaniem koronowym.

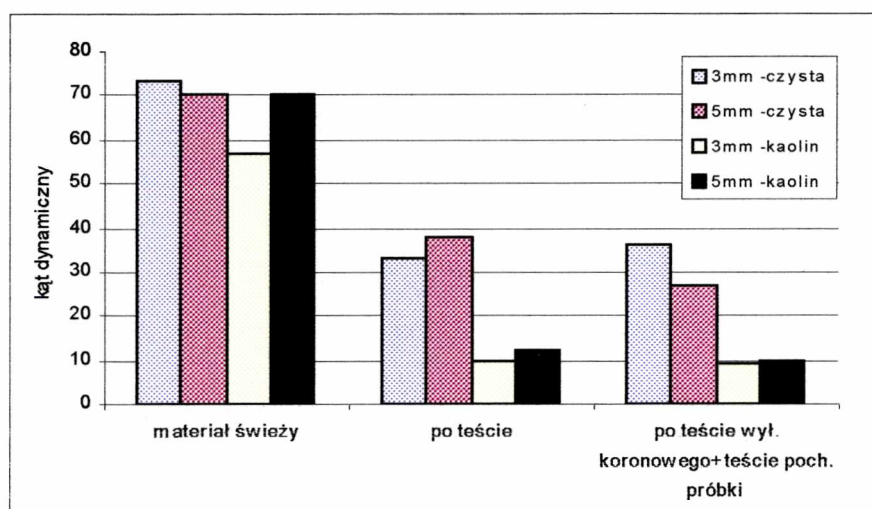
Może to mieć związek z częściową hydrofobizacją powierzchniowych zanieczyszczeń chociaż wyniki pomiarów zwilżalności pokrycia po zakończeniu badań metodą pochyłej próbki wskazują na utratę hydrofobowości przez tę gumę. Podobne wyniki uzyskano dla gumy RTV dodatkowo starzonej wyładowaniem koronowym (rys.7.4.6). W przypadku elastomeru HTV zaobserwowano występowanie związku pomiędzy średnią wartością impulsów prądu upływu a grubością próbek tylko dla materiału czystego. I tak dla próbek starzonych wyładowaniem koronowym o grubości 3 mm jak i 5 mm średni prąd upływu był około 25% wyższy niż na próbkach świeżych (rys.7.4.4).



Rys. 7.4.6. Utrata hydrofobowości przez pokrycie RTV w teście pochyłej próbki.

Porównanie średnich wartości impulsów prądowych wykazuje, że rejestrowany prąd był o około 22% niższy na próbkach grubszych tak materiału świeżego jak i starzonego (rys. 7.4.4). Wskazuje to na fakt, że jakkolwiek dynamika odzysku hydrofobowości na próbkach

cieńszych jest zwykle większa niż na grubszych to w przypadku długotrwałego narażenia grubość próbki może mieć istotne znaczenie podczas minimalizowania narażeń występujących w dłuższym spektrum czasowym. Ciekawy wynik rejestracji prądów uzyskano na zabrudzonych próbkach materiału HTV (rys. 7.4.5). Niezależnie od grubości próbek wartości rejestrowanych prądów były zbliżone i o około 20% wyższe na próbkach starzonych wyładowaniem koronowym. W odróżnieniu od materiału RTV obecność zabrudzenia na próbkach materiału HTV spowodowała około 70-80% wzrost wartości prądu w stosunku do próbek czystych zwłaszcza starzonych. Wynika stąd, że badany materiał HTV jest albo mniej odporny na starzenie wyładowaniem koronowym w stosunku do badanego pokrycia RTV albo ma gorsze właściwości odzysku hydrofobowości w obecności zabrudzeń. Wydaje się, że bardziej prawdopodobne jest przypuszczenie o słab-



Rys. 7.4.7. Utrata hydrofobowości przez materiał HTV w teście pochylej próbki.

szej hydrofobizacji zabrudzeń przez materiał HTV na co mogą wskazywać wyniki przedstawione na rysunku 7.4.7. Na rysunku tym widać wyraźnie, że obecność zabrudzeń (kaolin) na świeżym materiale HTV o grubości 3 mm powoduje wzrost jego zwilżalności czego już nie obserwuje się na próbkach o grubości 5 mm. Wyniki badań wskazują, że obecność zabrudzeń spowodowała też większy wzrost zwilżalności powierzchni próbek w stosunku do powierzchni czystych po przeprowadzeniu testu (rys. 7.4.7).

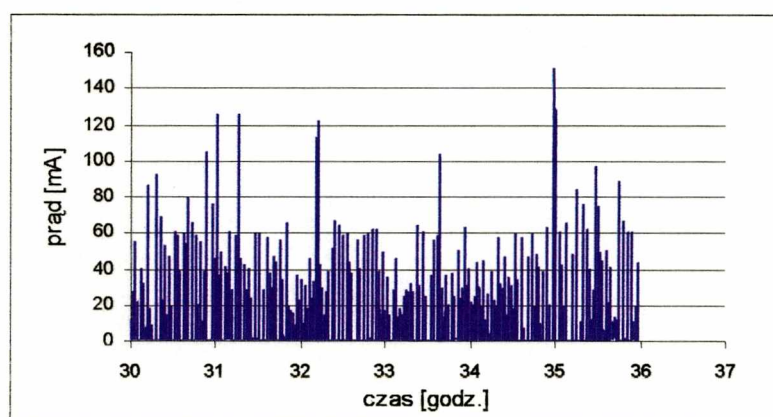
Przeprowadzony eksperyment spowodował silny wzrost zwilżalności próbek, a w jego następstwie degradację ich powierzchni. Ze względu na dużą koncentrację linii sił pola elektrycznego aktywność wyładowań była największa w obszarach przyelektrodowych, a szczególnie przy elektrodzie uziemionej. W miejscach tych erozja materiału po 6 godzinach prowadzenia testu była jednak niewielka (rys. 7.4.8).



Rys. 7.4.8. Wyladowanie elektryczne przy elektrodzie uziemionej.

Jak wynika z oględzin próbek z elastomerów silikonowych HTV i RTV po przeprowadzonym teście były one zdegradowane w porównywalny sposób. Niewielkie ślady erozji – zdecydowanie poniżej 0,2 mm [65] - występowały jedynie w miejscu styku elektrod czyli tam gdzie natężenie pola było najbardziej nierównomierne i gdzie gromadził się elektrolit. Na podstawie 6-godzinnego badania zmodyfikowaną metodą pochyłej próbki można stwierdzić, że różnice pomiędzy właściwościami obu gum silikonowych były praktycznie niezauważalne. Z tego względu przeprowadzono dodatkowo długotrwałe badania obu materiałów opisaną metodą rezygnując z wcześniej przyjętych kryteriów kończących eksperyment tzn. ograniczenia prądowego do maksymalnie 60 mA i sześciogodzinnego limitu czasu. W centrum zainteresowania była obserwacja zmian prądu oraz stanu badanych powierzchni.

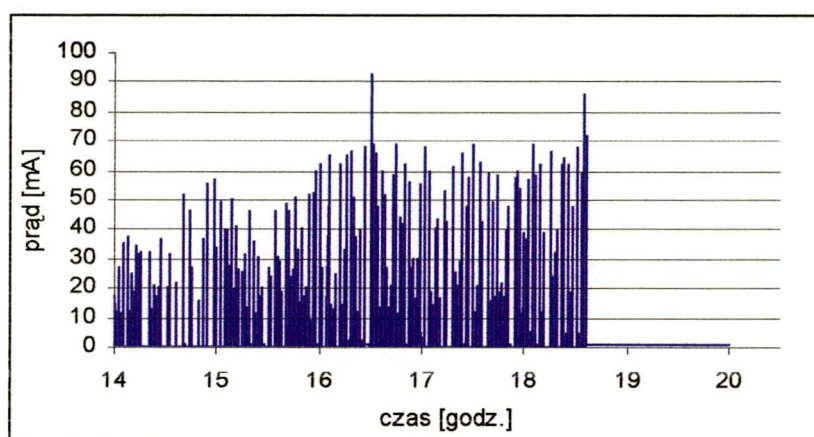
W przypadku czystych lub zabrudzonych próbek pokrycia RTV każdorazowo eksperyment przerywano w chwili gdy erozja materiału była na tyle duża, że wypalony przez przepływający prąd materiał odsłaniał podłoże z tworzywa sztucznego (rysunek 7.4.10 i 7.4.12). Na rysunkach 7.4.9 i 7.4.11 przedstawiono przebieg zmian prądu upływu w czasie ostatnich godzin starzenia próbek pokrycia RTV.



Rys. 7.4.9. Przebieg zmian prądu upływu w czasie starzenia czystej próbki RTV (rys. 7.4.10).



Rys. 7.4.10. Erozja czystego pokrycia RTV spowodowana długotrwałym przepływem prądu (po około 36 godzinach) w zmodyfikowanym teście pochylej próbki.



Rys. 7.4.11. Przebieg zmian prądu upływu w czasie starzenia zabrudzonej próbki RTV (rys.4.12).



Rys. 7.4.12. Erozja zabrudzonego pokrycia RTV spowodowana długotrwałym przepływem prądu (po około 20 godzinach) w zmodyfikowanym teście pochylej próbki.

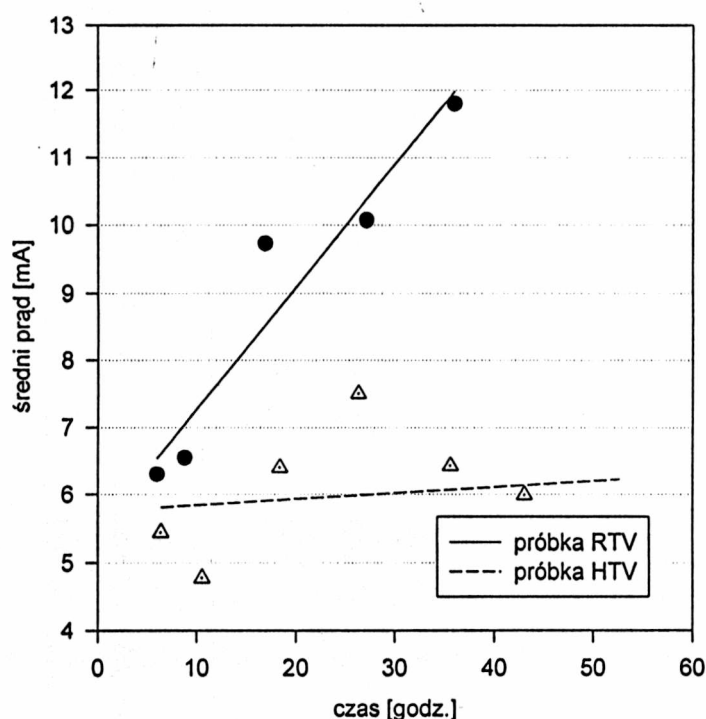
Degradacja materiału w obecności zabrudzeń trwała około 20 godzin gdy tymczasem w przypadku próbek czystych czas ten wynosił prawie 40 godzin. Stopień erozji próbki zabrudzonej (rys. 7.4.12) po około 20 godzinach testu oraz próbki czystej (rys. 7.4.10) po

36 godzinach testu wskazuje, że wypalająca się warstwa zabrudzeń wydatnie wpłynęła na przyspieszenie całego procesu.

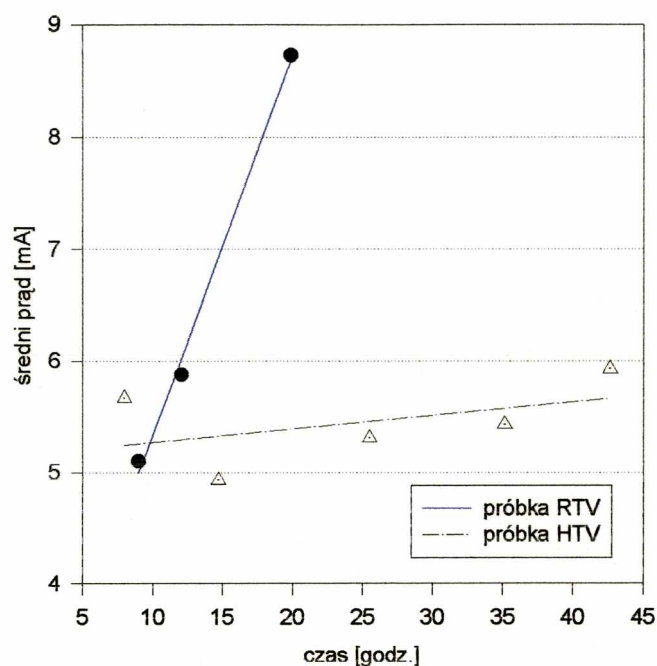
Obliczona średnia wartość prądu dla czystego pokrycia RTV nie przekraczała 2 mA, a w obecności zabrudzeń była nawet nieco niższa i wynosiła około 1,6 mA. Natomiast analiza średnich wartości impulsów prądowych przekraczających wartość 1 mA wskazuje na ich stopniowy wzrost w czasie trwania eksperymentu. Tendencja ta dotyczyła zarówno próbek czystych jak i zabrudzonych (rysunek 7.4.13 i 7.4.14) i była znacznie wyraźniejsza na próbkach gumy RTV co wynika z nachylenia krzywych wzrostu prądu w stosunku do osi czasu.

W przypadku czystego materiału HTV średnie wartości rejestrowanego prądu były wyższe od średnich wartości prądu rejestrowanych na pokryciu RTV i oscylowały na poziomie 4,4–5 mA. Obecność zabrudzeń spowodowała ich obniżenie do około 3,1–3,3 mA.

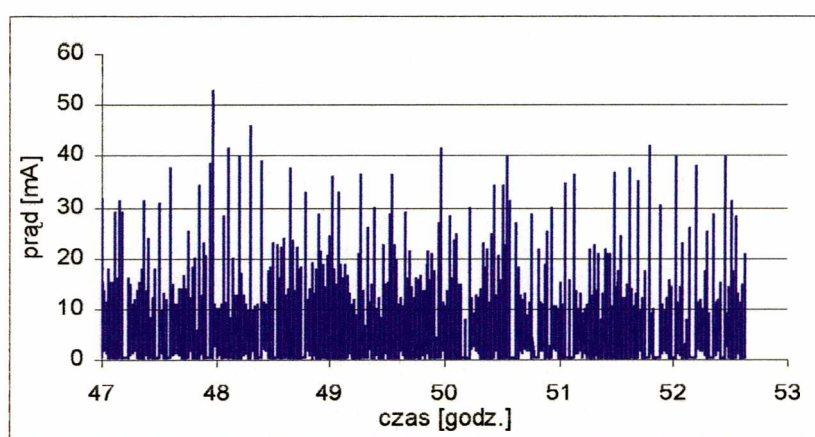
Podobnie jak w przypadku pokrycia RTV obecność powierzchniowych zabrudzeń wyraźnie sprzyjała procesowi degradacji powierzchni (rysunek 7.4.16 i 7.4.18). Analogicznie jak w przypadku pokrycia RTV na rysunkach 7.4.15 i 7.4.17 przedstawiono przebieg zmian prądu upływu w czasie ostatnich godzin starzenia.



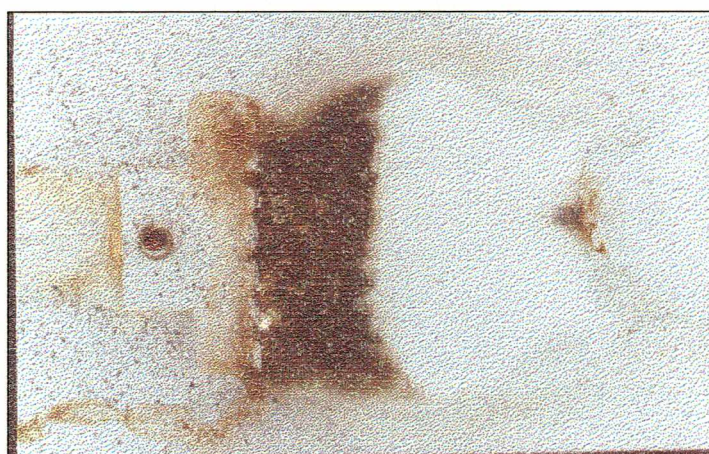
Rys. 7.4.13. Wartość średnia impulsów prądowych przekraczających wartość 1 mA – czyste próbki materiału RTV i HTV



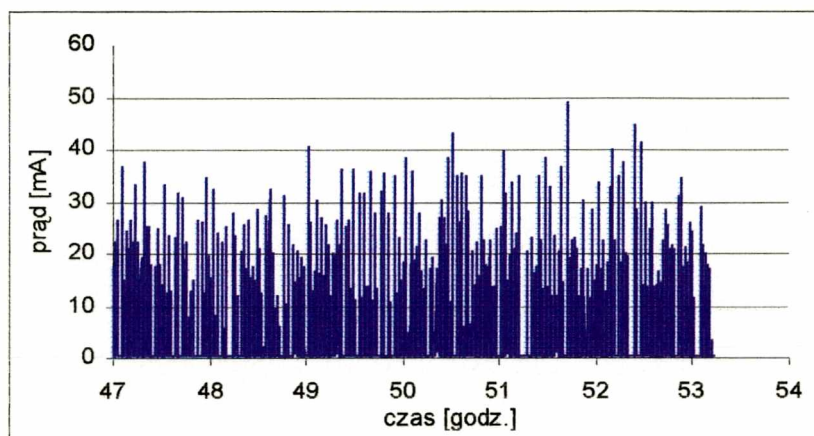
Rys. 7.4.14. Wartość średnia impulsów prądowych przekraczających wartość 1 mA zabrudzone próbki materiału RTV i HTV



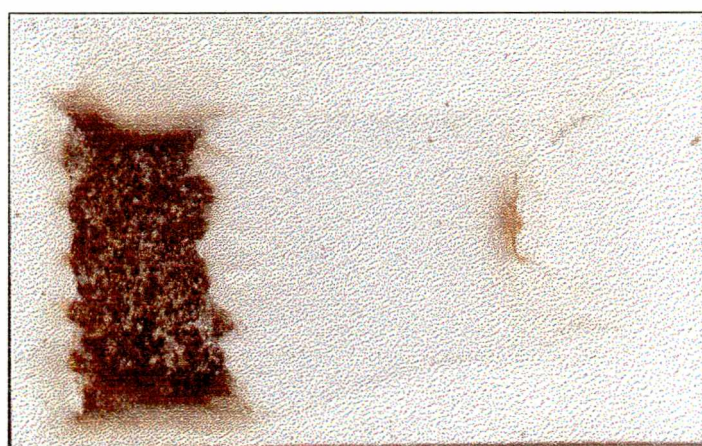
Rys. 7.4.15. Przebieg zmian prądu upływu w czasie starzenia czystej próbki HTV (rys.7.4.16).



Rys. 7.4.16. Erozja czystego elastomeru HTV spowodowana długotrwałym przepływem prądu (po około 53 godzinach) w zmodyfikowanym teście pochylej próbki.



Rys. 7.4.17. Przebieg zmian prądu upływu w czasie starzenia zabrudzonej próbki HTV (rys.7.4.18).



Rys. 7.4.18. Erozja zabrudzonego elastomeru HTV spowodowana długotrwałym przepływem prądu (po około 50 godzinach) w zmodyfikowanym teście pochylej próbki.

Można również zwrócić uwagę na fakt, że większy prąd upływu nie spowodował silniejszego uszkodzenia próbek HTV w stosunku do obserwowanego na próbkach RTV. Wynika stąd nieco inna filozofia budowania odporności obu tych materiałów na narażenia zewnętrzne. Wydaje się, że badany materiał HTV przy gorszej hydrofobowości jest bardziej odporny na przepływ dużych prądów upływu natomiast materiał RTV nie dopuszcza do ich powstawania nawet w obecności zabrudzeń przez ich szybką hydrofobizację. Wynika stąd dalej, że materiał HTV bardziej nadaje się na otwarte powierzchnie izolatora narażane opadami atmosferycznymi ale i dobrze samo oczyszczające się (powierzchnie kloszy), natomiast materiał RTV może być efektywnie eksploatowany w warunkach zabrudzeń (pień izolatora).

Istotną różnicę w stosunku do gumy RTV stanowił fakt, że średnia wartość prądu obliczona po każdym dniu trwania eksperymentu oscylowała na tym samym poziomie tzn. około 4,5 mA na próbkach czystych i około 3,3 mA na zabrudzonych podczas gdy w przypadku pokrycia RTV wartości te wzrastają zarówno dla czystych jak i zabrudzonych próbek.

Tendencja do stabilizacji prądu na gumie HTV jest też wyraźnie widoczna w przypadku średnich wartości prądów obliczonych dla impulsów prądowych których amplituda przekraczała wartość 1 mA (rysunek 7.4.13 i 7.4.14). Tak znacznie różniące się przebiegi prądowe dla gumy RTV i HTV mogą stanowić wyjaśnienie odmienności śladów erozyjnych przedstawionych na rys. 7.4.10, 7.4.12 i 7.4.16 oraz 7.4.18. O ile więc proces erozji w przypadku pokrycia RTV koncentrował się na stosunkowo niewielkim obszarze i szedł w „głęb” materiału (rysunki. 7.4.10, 7.4.12) o tyle w przypadku badanej gumy HTV dotyczył całego obszaru przyelektrodowego, a zniszczeniu uległa powierzchniowa warstwa materiału. Wynika stąd więc dalej, że przepływ ciągłego, małego prądu po powierzchni gumy silikonowej może powodować jej mniejszą degradację w stosunku do pojedynczych impulsów prądowych o dużych wartościach amplitudy. Prawdopodobnie zasadnicze znaczenie ma lokalnie dostarczona do materiału ilość energii w jednostce czasu i skutki jakie to powoduje w zakresie deformacji chemicznej struktury materiału. Wskazuje to jeszcze raz na fakt arbitralności przyjmowanego w teście RWDT kryterium prądowego początkowego okresu stanu hydrofobowości materiału.

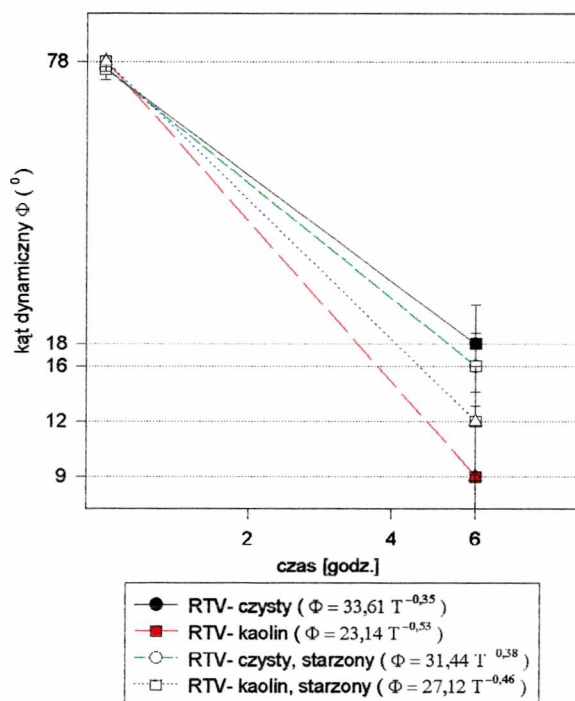
Przeprowadzone badania składu chemicznego zerodowanych powierzchni próbek RTV i HTV metodą spektroskopii w podczerwieni wykazały wzrost zawartości do około 120-140% w stosunku do materiału świeżego grup funkcyjnych zawierających w swoim składzie tlen tj. Si-O-Si (pasmo absorpcyjne 1040 cm^{-1}) oraz Si-O-CH₃ (pasmo absorpcyjne 1100 cm^{-1}). Zaobserwowany wzrost dotyczył zarówno próbek czystych jak i zbrudzonych, a wyjaśnić go może wysoka intensywność elektrycznych wyładowań powierzchniowych w czasie trwania eksperymentu, która sprzyjała procesowi utleniania. Wzrostowi zawartości powyższych grup funkcyjnych towarzyszył ubytek do około 60-70% grup Si-CH=CH₂ (pasmo absorpcyjne 950 cm^{-1}) oraz 40-50% ubytek grup Si(CH₃)₃ i Si(CH₃)₂ (pasma absorpcyjne $760, 810$ i 880 cm^{-1}), których wiązania zostały prawdopodobnie zerwane wskutek powierzchniowych wyładowań, a w ich miejsce został dołączony tlen.

Po oczyszczeniu zerodowanych powierzchni zawartość grup funkcyjnych wskazujących na wysoki poziom powierzchniowego utlenienia materiałów niewiele się zmieniła.

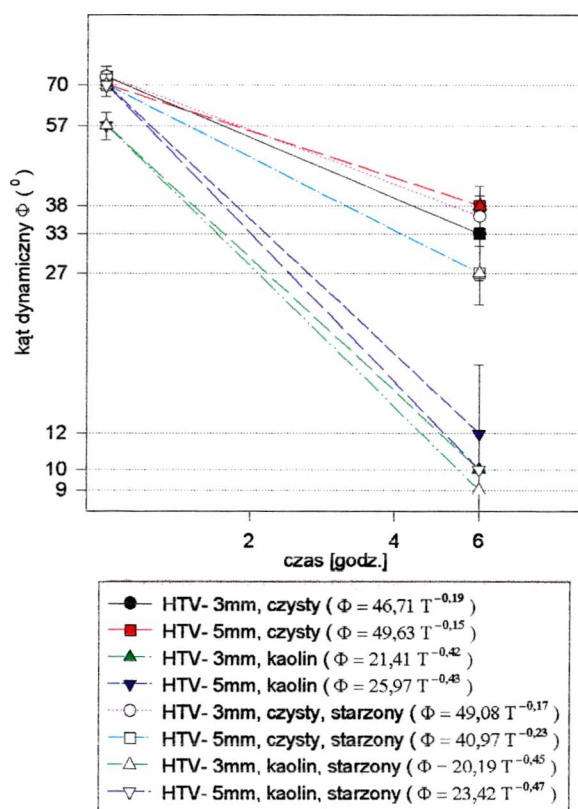
Analogicznie jak w rozdziale 7.3 wyniki badań zmian zwilżalności przedstawiono na wykresach przy logarytmicznej skali czasu (rysunek 7.4.19 i 7.4.20).

Porównanie tych wykresów wskazuje na potwierdzoną już we wcześniejszych badaniach różnicę w zachowaniu materiałów HTV w obecności powierzchniowych zanieczyszczeń w odniesieniu do materiału świeżego (czystego) jak i starzonego ulotem. W przypadku

materiału RTV różnica ta nie jest tak widoczna jednak utrata niskiej zwilżalności również na próbkach czystych jest bardzo głęboka.



Rys. 7.4.19. Utrata i odzysk hydrofobowości przez próbki materiału RTV.



Rys. 7.4.20. Utrata i odzysk hydrofobowości przez próbki materiału HTV.

Przedstawione zależności umożliwiają obliczenie przybliżonego stopnia zwilżania powierzchni po określonym czasie oddziaływania prądu upływu w obecności solanki o konduktywności 1,5 mS/cm i przy natężeniu pola 0,8 kV/cm.

7.4.2. Podsumowanie wyników.

Zaproponowano modyfikację badań metodą pochyłej próbki tak aby można ją było zastosować bezpośrednio do oceny odporności gum silikonowych na powstawanie śladów erozyjnych spowodowanych przepływem prądu upływu i wyładowaniami elektrycznymi bez konieczności wstępnego zwiększania zwilżalności gum.

Stwierdzono, że zaproponowana metoda umożliwia rozróżnienie właściwości gum silikonowych co było praktycznie niemożliwe podczas badań metodą tradycyjną z uwagi na trudności w zwilżaniu powierzchni hydrofobowych i zbyt duże nachylenie próbek.

Wyniki wykonanych badań gum silikonowych RTV i HTV prowadzą do następujących wniosków:

- Dynamika utraty niskiej zwilżalności na gumie silikonowej RTV jest większa w stosunku do gumy HTV co wpływa na kształt i wartości prądów mierzonych na próbkach obu gum świeżych, starzonych ulotem lub zabrudzonych kaolinem z solą kuchenną.
Mniejsza zwilżalność gumy RTV decyduje o przebiegu badań porównawczych w pierwszych 5-10 godzinach ich trwania.
- Kształty prądów upływu na gumach silikonowych RTV i HTV są odmienne i dla materiału RTV mają charakter osobnych impulsów (niska zwilżalność powierzchni) podczas gdy na materiale HTV prąd uzyskuje postać prawie ciągłą (wyższa zwilżalność).
- Pomimo większej średniej wartości prądu, w początkowym okresie 6 godzin na powierzchni gumy HTV – w stosunku do średniej wartości prądu zmierzonej na gumie RTV – nie stwierdzono występowania większej erozji materiału HTV. Dotyczyło to zarówno materiału świeżego, starzonego wyładowaniem ulotowym lub zabrudzonego kaolinem z solą. Materiał HTV był więc bardziej odporny na przepływ prądu upływu i powierzchniowe wyładowania elektryczne.
- Z punktu widzenia skutków przeprowadzonej próby (ślady erozyjne) pierwsze 6 godzin badań nie pozwoliło na rozróżnienie właściwości obu gum silikonowych.

- Tworzenie się głębokich śladów erozyjnych w przypadku gumy silikonowej RTV jest związane ze wzrostem częstości występowania w widmie prądu impulsów prądowych o wartościach 10 mA i więcej w miarę trwania eksperymentu co w niewielkim stopniu ma miejsce w przypadku widma prądu rejestrowanego na gumie HTV.
- Obecność zabrudzeń na powierzchni materiału RTV powodowała około 2-krotne przyspieszenie występowania śladów erozyjnych czego nie obserwowano w przypadku gumy HTV. Ponadto obecność zabrudzeń pozytywnie wpływała na powtarzalność wyników badanych gum przez wyraźne ograniczenie rozrzutu średnich wartości mierzonych prądów upływu.
- Ślady erozyjne powstające na gumie RTV są ukierunkowane w głąb materiału co może wskazywać na lokalne kumulowanie energii wyładowań elektrycznych podczas gdy ślady powstające na materiale HTV są ukierunkowane powierzchniowo co może wskazywać na zdolność materiału do rozpraszania energii.
- Otrzymane wyniki badań wskazują na potrzebę 3-krotnego wydłużenia czasu badań gum silikonowych zmodyfikowaną metodą pochyłej próbki w przypadku powierzchni czystych lub 2-krotnego w przypadku zabrudzonych w stosunku do metody znormalizowanej.

Wydaje się więc, że potwierdza się spostrzeżenie dotyczące lepszej przydatności gumy silikonowej HTV na otwarte powierzchnie izolatora (klosze) poddane narażeniom opadami atmosferycznymi podczas gdy pokrycie RTV może być efektywniej wykorzystane na powierzchniach chronionych izolatora.

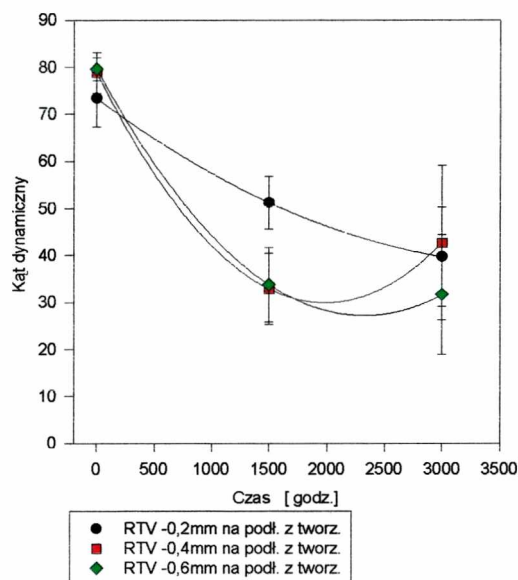
Otrzymane wyniki mogą również wskazywać, że przyjęte powszechnie kryterium prądowe 1 mA w teście koła śladu pełnego i erozji (RWDT) może być zbyt surowe dla badanego elastomeru HTV.

7.5. Badania starzeniowe w komorze klimatycznej.

7.5.1. Wyniki badań.

Przedmiotem badań były próbki wykonane z dwóch typów elastomerów silikonowych – materiału HTV oraz pokrycia RTV na podłożu szklanym i z tworzywa sztucznego. Przygotowano 3 grupy próbek RTV różniących się grubością, z których każda liczyła po 6 sztuk. Łącznie stanowiło to 36 próbek – po 18 na jednakowym podłożu. Analogicznie podzielono próbki gumy HTV - w tym przypadku o 2 grubościach 3 i 5 mm. Dokładny opis próbek przedstawiono w rozdziale 6.1.

Wyniki pomiarów kątów zwilżania pokrycia RTV, dla którego podłożem było tworzywo sztuczne wskazują, że proces degradacji postępował znacznie intensywniej w pierwszej połowie eksperymentu. Zaznacza się tutaj wyraźny wpływ grubości materiału na dynamikę zmian zwilżalności powierzchni próbek (rys.7.5.1).



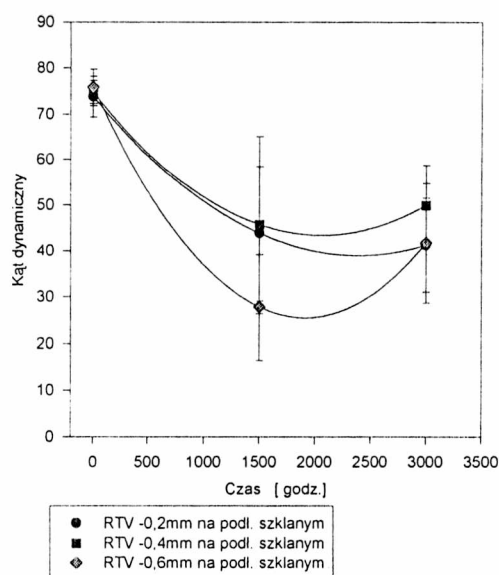
Rys. 7.5.1. Przebieg utraty i odzysku hydrofobowości przez pokrycie RTV na podłożu z tworzywa sztucznego w komorze klimatycznej ATLAS.

Po 1500 godzinach starzenia najlepsze wyniki otrzymano dla próbki o najmniejszej grubości - około 51° , gdy tymczasem dla obu grubszych - 0,4 i 0,6 mm - kąty dynamiczne oscylowały na poziomie 33° . Końcowe wyniki pomiarów (po 3000 godzin) dla próbek o grubości 0,4mm wzrosły do wartości około 40° . Świadczyć to może o przechodzeniu pokrycia do pewnego stanu równowagi. Dla próbek o grubości 0,2 mm wartości te uległy obniżeniu do poziomu 40° zaś w przypadku najgrubszych spadek ten był bardzo niewielki. Analiza pasm absorpcyjnych w widmie podczerwieni materiału świeżego wykazuje, że im próbka jest grubsza tym zawiera więcej grup funkcyjnych. Po 1500 godzinach testu tendencja ta była zachowana z wyjątkiem pasma 850 cm^{-1} odpowiedzialnego za grupy Si-C oraz $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$, których najwięcej było w próbce najcieńszej, a najmniej w najgrubszej. Po 3000 godzin starzenia najwięcej grup funkcyjnych posiadała próbka najcieńsza, następnie o grubości 0,4mm i na końcu o grubości 0,6mm. Natomiast zawartość grupy Si-C i $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ była taka sama dla próbek o grubości 0,2 i 0,4mm i mniejsza dla próbki najgrubszej. Procentową zawartość poszczególnych grup funkcyjnych przedstawia tabela 7.5.1.

pasmo [cm ⁻¹]	grubość pokrycia RTV			grupa funkcyjna
	0,2mm	0,4mm	0,6mm	
810	84%	47%	24%	Si (CH ₃) ₂
850	24%	26%	16%	Si (CH ₃) ₃ ; Si - C
1030	90%	58%	25%	Si - CH = CH ₂ ; Si - O - Si
1100	81%	59%	26%	Si - O - CH ₃
1280	72%	53%	28%	CH ₃ w grupie Si (CH ₃) ₂

Tabela 7.5.1. Procentowa zawartość poszczególnych grup funkcyjnych po 3000 godzin starzenia w komorze klimatycznej - pokrycie RTV na podłożu z tworzywa sztucznego.

Analogiczne wyniki otrzymano po pierwszej części testu dla pokrycia podłożu szklanym (rys.7.5.2). Tendencja spadku hydrofobowości uwidoczniła się szczególnie dla najgrubszego pokrycia osiągając poziom około 28°. Wartości kątów dynamicznych dla dwóch pozostałych grubości prawie się pokrywały i oscylowały w granicach 45-47°. Po 3000 godzin zaobserwowano wyraźny wzrost poziomu hydrofobowości dla próbek o grubości 0,6 mm z 28 do 42° gdy równocześnie dla próbek o grubości 0,4 mm poziom ten wzrósł tylko nieznacznie



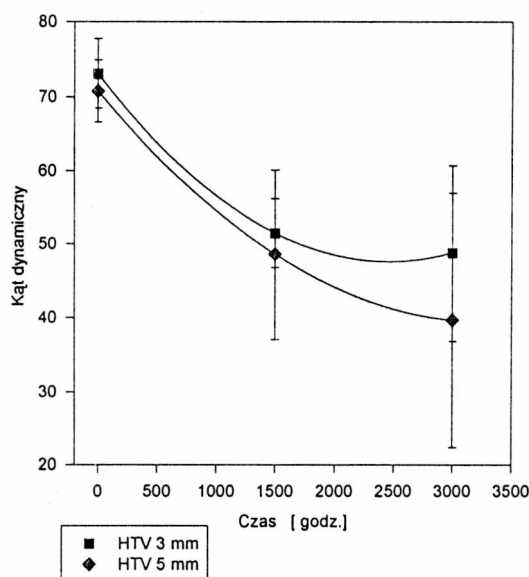
Rys. 7.5.2. Przebieg utraty i odzysku hydrofobowości przez pokrycie RTV na podłożu szklanym w komorze klimatycznej ATLAS.

do około 50°. Próbki najcieńsze wykazywały dalszą tendencję spadkową. W przypadku podłoża szklanego dynamika odzysku hydrofobowości dla próbek o grubości 0,6mm była wyraźnie wyższa.

W celu określenia stopnia zdegradowania badanego materiału w komorze klimatycznej przeprowadzono regenerację hydrofobowości starzonych próbek w temperaturze 40°C. Materiał czysty oraz zabrudzony zanieczyszczeniem naturalnym okazał się całkowicie

hydrofilny zarówno na podłożu szklanym jak i z tworzywa. Kąty dynamiczne dla próbek o grubości 0,2 mm i 0,4 mm na podłożu z tworzywa zabrudzonych kaolinem z solą osiągnęły poziom 31°, zaś o grubości 0,6 mm - 34°. W przypadku podłoża szklanego zaznacza się wpływ grubości tzn. poziom zwilżalności dla próbki najgrubszej wynosił 42°, dla próbek o grubościach 0,4mm i 0,2mm około 30°. Wyniki te wskazują, że za odzysk hydrofobowości może być odpowiedzialny w tym przypadku proces dyfuzji frakcji niskomolekularnej z wnętrza materiału. Obecność zabrudzenia sztucznego wpływa na wzrost efektywność procesu regeneracji.

Wyniki pomiarów kątów zwilżania próbek HTV dokonane w połowie i na końcu eksperymentu wskazują, że proces degradacji postępował podobnie jak w przypadku pokrycia RTV. Przebieg zmian wartości kątów dynamicznych przedstawia wykres na rysunku 7.5.3.



Rys. 7.5.3. Przebieg utraty i odzysku hydrofobowości przez materiał HTV w komorze klimatycznej ATLAS.

Zauważalny jest wpływ grubości próbek na wyniki pomiarów. Próbki cieńsze w niewielkim stopniu lepiej odzyskiwały hydrofobowość niż próbki grubsze. Wszystkie wyniki mieszczą się w granicach rozrzutów pomiarowych, które wahają się na poziomie 15 - 20°. Średnie wartości kątów dynamicznych wskazują, że materiał osiągnął już przyjętą granicę 40°, poniżej której uznajemy go za hydrofilny. Po zakończeniu eksperymentu wszystkie próbki poddano procedurze odzysku hydrofobowości podobnie jak próbki RTV dzieląc je również na 3 grupy i odpowiednio zabrudzając. Otrzymane wyniki dla próbek czystych pozostały bez zmian tzn. wartości kątów dynamicznych przed i po cyklu odzyskiwania nie zmieniły się. Materiał zabrudzony zanieczyszczeniem naturalnym nie

odzyskał właściwości hydrofobowych, a otrzymane wyniki oscylował na poziomie 6-8°, zaś dla próbek zanieczyszczonych kaolinem z solą otrzymano wartość 28° dla grubości 3 mm i 37° dla 5 mm. Uwidocznił się tutaj wyraźny wpływ grubości na wyniki pomiarów.

Analiza składu chemicznego metodą spektroskopii w podczerwieni próbek materiału HTV wykazuje pewne obniżenie zawartości grup Si-O-CH₃ oraz CH₃ po 1500 godzinach starzenia, których zawartość po 3000 godzin starzenia wyraźnie wzrosła (tabela 7.5.2 – pasma 1100–1280 cm⁻¹).

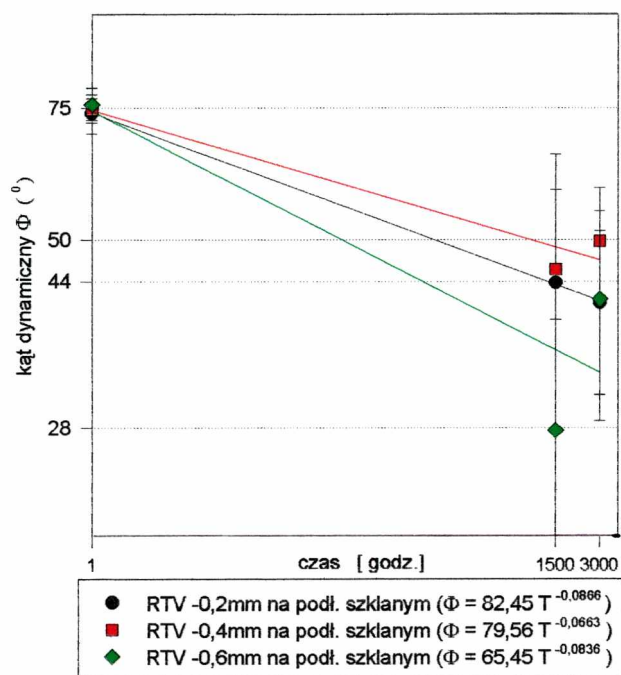
pasmo [cm ⁻¹]	1500 godz.	3000 godz.	grupa funkcyjna
760	76%	39%	Si (CH ₃) ₃
810	84%	49%	Si (CH ₃) ₂
880	99%	99%	Si (CH ₃) ₃ ; Si - C
1040	92%	90%	Si - CH = CH ₂ ; Si - O - Si
1100	75%	90%	Si - O - CH ₃
1280	63%	98%	CH ₃ w grupie Si (CH ₃) ₂

Tabela 7.5.2. Procentowa zawartość poszczególnych grup funkcyjnych po 1500 i 3000 godzin starzenia w komorze klimatycznej - materiał HTV o grubości 3 mm.

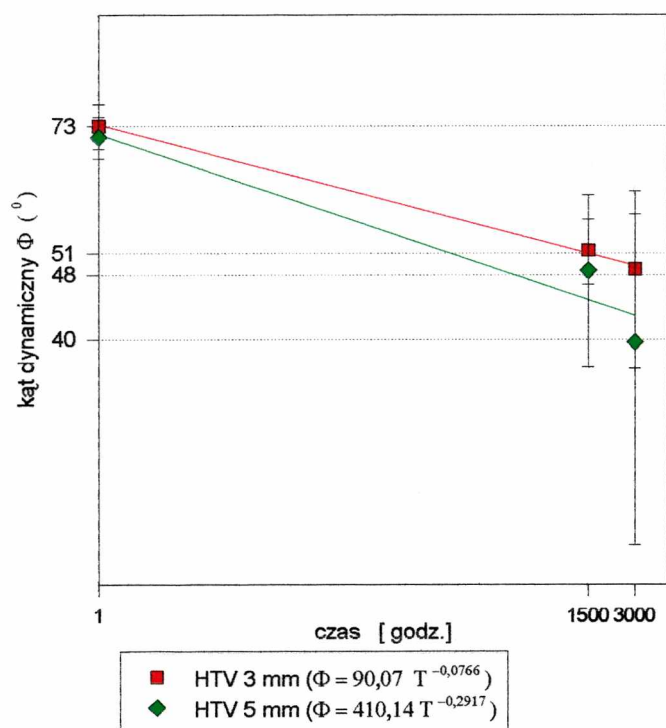
Wyniki badań chemicznych są w przybliżeniu zgodne z pomiarami zwilżalności powierzchni po 1500 i 3000 godzin trwania eksperymentu. Porównanie wpływu grubości na absorpcję widma promieniowania podczerwonego wykazuje większą zawartość wszystkich grup funkcyjnych dla materiału grubszego. Wyjątek stanowi tu grupa Si-C (880 cm⁻¹), której jest więcej w próbce cieńszej.

Podobnie jak w poprzednich rozdziałach wyniki badań przedstawiono również na wykresach przy logarytmicznej skali czasu (rys. 7.5.4 – 7.5.5) oraz obliczono zależności opisujące degradację badanych materiałów.

Przy uwzględnieniu współczynnika przyspieszenia starzenia, zależności te umożliwiają oszacowanie stanu zwilżalności powierzchni narażanych przez opady i promieniowanie UV po określonym czasie starzenia.



Rys. 7.5.4. Przebieg utraty i odzysku hydrofobowości przez pokrycie RTV na podłożu szklanym w komorze klimatycznej ATLAS.



Rys. 7.5.5. Przebieg utraty i odzysku hydrofobowości przez materiał HTV w komorze klimatycznej ATLAS.

7.5.2. Podsumowanie wyników.

Proces utraty hydrofobowości badanych gum silikonowych był znacznie wyższy w pierwszej części eksperymentu. W przypadku pokrycia RTV obserwuje się niewielki wzrost hydrofobowości po 1500 godzinach starzenia co może oznaczać przejście materiału do pewnego stanu równowagi dynamicznej. Cieńsze próbki obu elastomerów wykazywały większą odporność na degradację co prawdopodobnie było związane z ich większą podatnością na nagrzewanie w warunkach przeprowadzonego eksperymentu, a w związku z tym ze zwiększoną dynamiką dyfuzji frakcji niskomolekularnych. Efektywność odzysku hydrofobowości badanych gum silikonowych była wyższa w obecności zabrudzenia sztucznego - kaolinu z solą co może wynikać z mniejszej powierzchni właściwej tego zabrudzenia.

Pomiędzy zwilżalnością powierzchniową i zawartością poszczególnych grup funkcyjnych w badanych materiałach istnieje dobra zbieżność, która wskazuje, że wartości kątów dynamicznych są wyższe dla próbek o wyższej zawartości grup funkcyjnych.

Zarówno proces starzenia jak i regeneracji hydrofobowości próbek obu elastomerów silikonowych nie wykazał występowania istotnych różnic właściwości badanych gum.

Analiza nachylenia krzywych zmian zwilżalności w czasie w układzie logarytmicznym wskazuje, że są one znacznie mniejsze niż w przypadku badań opisanych w podrozdziałach 7.3 i 7.4 co pośrednio wskazuje na rolę obecności prądu upływu i wyładowań elektrycznych podczas procesu starzenia gum.

7.6. Test długotrwałego oddziaływania wody na właściwości hydrofobowe gum silikonowych.

7.6.1. Wyniki badań.

Przedmiotem badań były próbki dwóch elastomerów silikonowych :

- HTV o dwóch grubościach 3 i 5mm ;
- pokrycie RTV na podłożu z tworzywa o 3 grubościach.

Szczegółowy opis próbek oraz sposób ich zabrudzania przedstawiono w rozdziale 6.

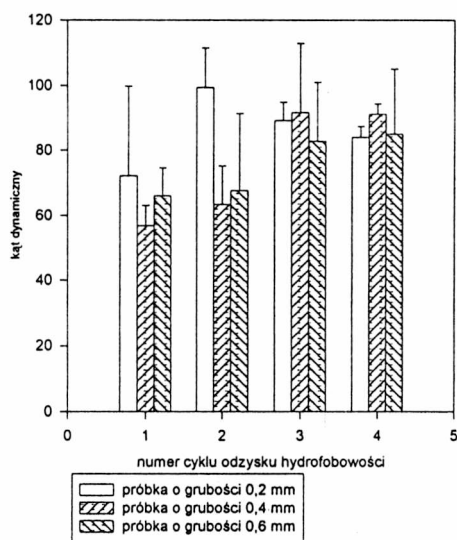
Przed rozpoczęciem eksperymentu wykonano pomiary dynamicznych i statycznych kątów zwilżania powierzchni świeżych próbek badanych materiałów. Dla materiału świeżego RTV wartości kątów dynamicznych zawierały się w zakresie 70-80° natomiast kąty statyczne mieściły się w zakresie 100-110°. Analogicznie dla gumy silikonowej HTV wartości kątów dynamicznych zawierały się w zakresie 70-75° a statyczne w zakresie 105-

110°. Wynika stąd, że początkowa zwilżalność obu badanych materiałów była porównywalna.

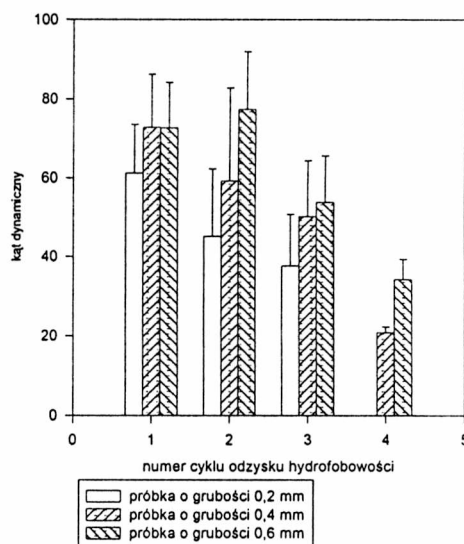
Po przeprowadzeniu pierwszego cyklu na czystych próbkach RTV kąty dynamiczne obniżyły się do poziomu około 30° co praktycznie wskazuje, że materiał nie odzyskał właściwości hydrofobowych. Nie stwierdzono wpływu grubości materiału na wielkości kątów dynamicznych uzyskanych w pomiarach.

Zbliżone wartości kątów dynamicznych po I cyklu zmierzono także na czystych próbkach materiału HTV.

W odróżnieniu od materiału RTV wyraźnie ujawnił się tutaj wpływ grubości próbek na dynamikę odzyskiwania właściwości hydrofobowych. Cieńsze próbki materiału HTV szybciej odzyskiwały hydrofobowość niż próbki grubsze. Obecność powierzchniowych zanieczyszczeń znacząco zwiększyła efektywność regeneracji właściwości hydrofobowych zarówno na próbkach materiału RTV jak i HTV. Na rysunkach 7.6.1 i 7.6.2 przedstawiono przebieg odzysku hydrofobowości w kolejnych cyklach dla próbek materiału RTV zanieczyszczonych odpowiednio kaolinem domieszkowanym solą kuchenną lub zanieczyszczeniem naturalnym.



Rys. 7.6.1. Odzysk hydrofobowości próbek materiału RTV zabrudzonego kaolinem



Rys. 7.6.2. Odzysk hydrofobowości próbek materiału RTV zabrudzonego zanieczyszczeniem naturalnym

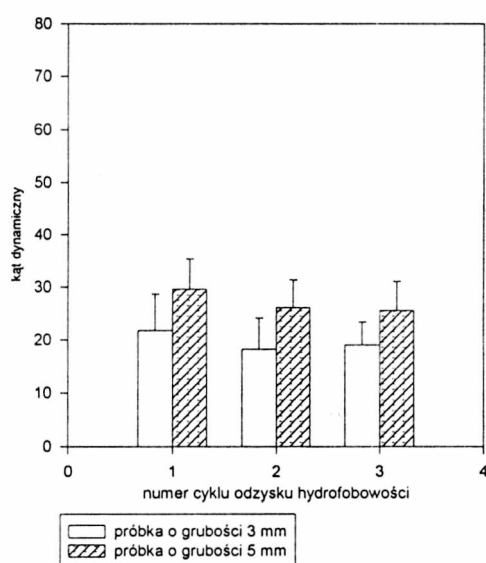
Efektywność regeneracji właściwości hydrofobowych (cykl I) w przypadku obecności obu zanieczyszczeń była wysoka, a dynamiczne kąty zwilżania zwykle zawierały się w granicach 55-70°.

Próbki materiału HTV, zanieczyszczone powierzchniowo kaolinem domieszkowanym solą kuchenną, praktycznie nie odzyskały właściwości hydrofobowych powierzchni. Jak

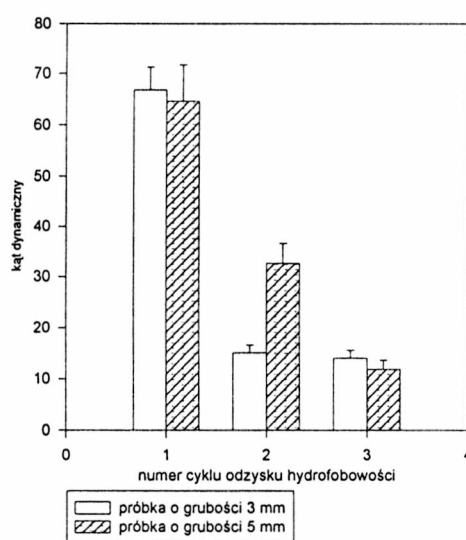
wynika z wykresu przedstawionego na rys. 7.6.3 dynamiczne kąty zwilżania nie przekraczały 30° przy wyraźnym ujawniającym się wpływie grubości materiału.

Takie zjawisko nie występowało podczas regeneracji hydrofobowości próbek gumy HTV zanieczyszczonych powierzchniowo zabrudzeniem naturalnym typu przemysłowego. Wartości dynamicznych kątów zwilżania wynosiły przeciętnie $60-70^\circ$ co wskazuje na prawie całkowitą regenerację właściwości hydrofobowych gumy HTV w tych warunkach (rys. 7.6.4). W przypadku II cyklu, podobnie jak w przypadku I, próbki czyste praktycznie nie odzyskały właściwości hydrofobowych tak w przypadku materiału RTV jak i HTV. Natomiast próbki RTV zanieczyszczone powierzchniowo kaolinem domieszkowanym solą w pełni odzyskały właściwości hydrofobowe a dynamiczne kąty zwilżania wynosiły dla tych próbek przeciętnie $60-100^\circ$ (rys. 7.6.1). Wysoka dynamika odzysku hydrofobowości na próbkach RTV o grubości 0,2 mm wskazuje na dyfuzję wystarczającej ilości frakcji niskomolekularnej potrzebnej do shydrofobizowania powierzchniowych zabrudzeń.

W przypadku zanieczyszczenia gumy RTV zabrudzeniami naturalnymi przeciętne wartości dynamicznych kątów zwilżania zawierały się w granicach $45-75^\circ$ (rys. 7.6.2). Jednocześnie ujawnił się tutaj wyraźny wpływ grubości próbek. I tak jedynie próbka o grubości 0,6 mm została całkowicie zregenerowana (kąty dynamiczne około 75°) natomiast powłoka najcieńsza odzyskała hydrofobowość jedynie częściowo, a przeciętne wartości kątów dynamicznych zawierały się w granicach $35-45^\circ$.



Rys. 7.6.3. Odzysk hydrofobowości próbek materiału HTV zabrudzonego kaolinem.



Rys. 7.6.4. Odzysk hydrofobowości próbek materiału HTV zabrudzonego zanieczyszczeniem naturalnym

Po III cyklu stwierdzono, że starzenie w wodzie czystych próbek materiałów HTV i RTV spowodowało dużą hydrofilność ich powierzchni, której praktycznie nie da się zregenerować przyjętą metodą. Dynamiczne kąty zwilżania na czystych próbkach gumy RTV wynosiły przeciętnie $40-45^\circ$ a w przypadku próbek z materiału HTV nie przekraczały 30° . Co więcej zabrudzenia powierzchni gumy HTV kaolinem lub zanieczyszczeniem naturalnym nie miało praktycznie wpływu na regenerację właściwości hydrofobowych próbek (rys. 7.6.3 i 7.6.4).

Natomiast próbki gumy RTV po zanieczyszczeniu kaolinem lub zabrudzeniem naturalnym w dalszym ciągu wykazywały dużą podatność na proces regeneracji hydrofobowości. Kąty dynamiczne mierzone na tych próbkach wynosiły przeciętnie $80-90^\circ$ w przypadku obecności kaolinu i $40-55^\circ$ w przypadku zanieczyszczenia naturalnego.

W ostatnim IV cyklu badaniom poddano jedynie gumę RTV, ponieważ próbki gumy HTV nie odzyskały hydrofobowości już po III cyklu. Podobnie jak w III cyklu, materiał RTV zabrudzony kaolinem odzyskał właściwości hydrofobowe, które można oszacować za pomocą dynamicznych kątów zwilżania w zakresie $80-90^\circ$. Natomiast regeneracja właściwości hydrofobowych gumy w obecności zanieczyszczeń naturalnych była zależna od jej grubości, a dynamiczne kąty zwilżania dla próbek o grubości 0,6 mm, powlekanych elastomerem silikonowym RTV osiągnęły wartość około 35° .

Po zakończeniu eksperymentu wszystkie próbki elastomerów silikonowych HTV i RTV poddano badaniu składu chemicznego powierzchni metodą spektroskopii w podczerwieni. Stwierdzono zgodność absorpcji charakterystycznych dla tych elastomerów długości widma z pomiarami zwilżalności powierzchniowej.

Analiza składu chemicznego próbek pokrycia RTV wyraźnie wskazuje na ubytki ilościowe grup funkcyjnych. W tabeli 7.6.1 przedstawiono procentową zawartość poszczególnych grup funkcyjnych w warstwie powierzchniowej starzonych próbek pokrycia RTV, przyjmując za 100% stan materiału świeżego. Najbardziej zdegradowane powierzchnie należały do próbek czystych, które nie były pokrywane zabrudzeniami (tab. 7.5.1). Wyniki te potwierdzają wcześniejsze pomiary hydrofobowości. Probki o grubości 0,2 i 0,4 mm, które były zabrudzone kaolinem wykazują większą absorpcję w paśmie $760 - 850 \text{ cm}^{-1}$ co oznacza

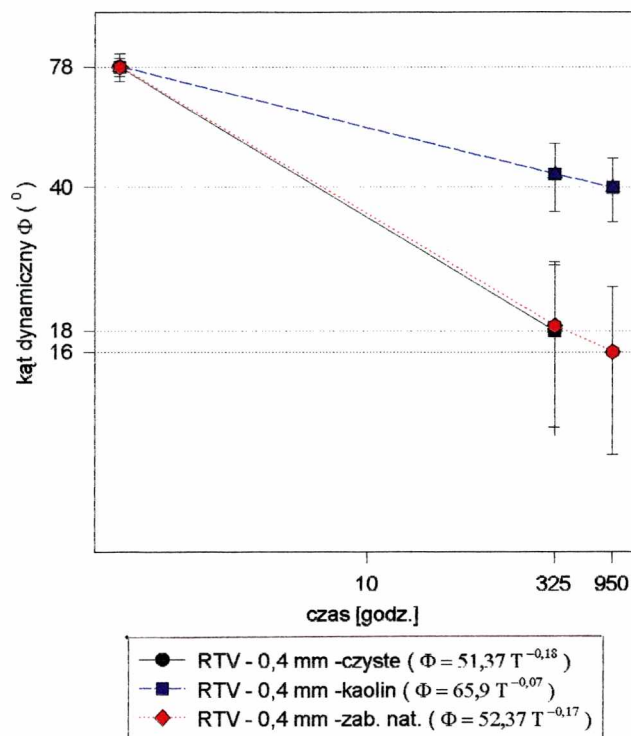
pasmo [cm ⁻¹]	próbki czyste	próbki zabrudzone		grupa funkcyjna
		kaolin	zab. nat.	
760	67%	82%	73%	Si (CH ₃) ₃
810	68%	95%	75%	Si (CH ₃) ₂
850	93%	79%	82%	Si (CH ₃) ₃ ; Si - C
1030	58%	107%	69%	Si - CH = CH ₂ ; Si - O - Si
1100	51%	72%	68%	Si - O - CH ₃
1280	42%	60%	48%	CH ₃ w grupie Si (CH ₃) ₂

Tabela 7.6.1. Próbkę pokrycia RTV o grubości 0,4 mm.

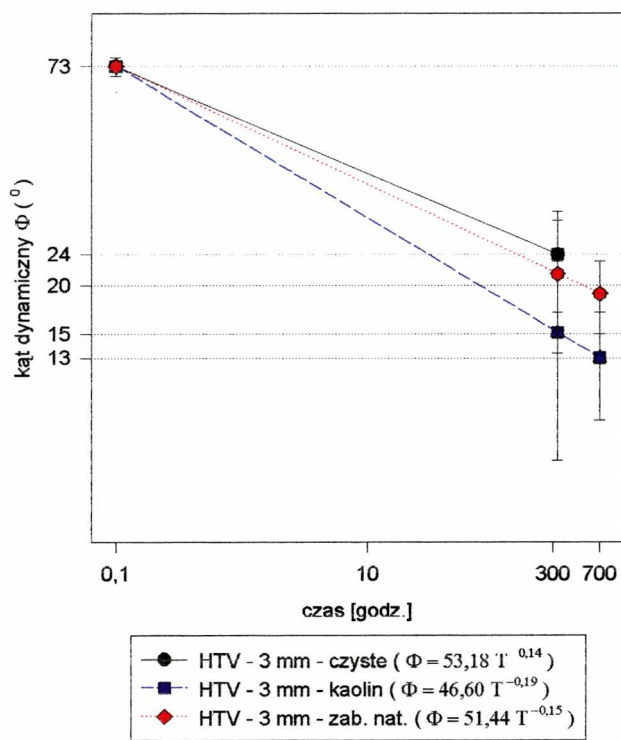
większą zawartość grup Si(CH₃)₃ i Si(CH₃)₂ niż próbki zabrudzone zanieczyszczeniem naturalnym. W paśmie od 1030 do 1280 cm⁻¹ próbki o grubości 0,4 mm zabrudzone kaolinem posiadają większą zawartość grup Si-O-Si oraz CH₃-Si= od próbek zabrudzonych zanieczyszczeniem naturalnym. Tendencja ta jest odwrotna dla materiału o grubości 0,2 mm. Materiał o grubości 0,6 mm wykazuje większą absorpcję w całym badanym paśmie dla próbek zabrudzonych zanieczyszczeniem naturalnym.

Reasumując, zabrudzenie naturalne korzystnie wpłynęło na zawartość wszystkich grup funkcyjnych w przypadku próbek najgrubszych (0,6 mm); kaolin z solą lepiej oddziaływał na próbki o grubości 0,4 mm za wyjątkiem pasma 850 cm⁻¹ odpowiedzialnego za zawartość grupy Si-C , której najwięcej było w materiale nie zabrudzonym (w grupie 0,4 mm) oraz na próbki najcieńsze (0,2mm) w paśmie 760-850 cm⁻¹ odpowiadającej obecności grupy Si(CH₃)₃.

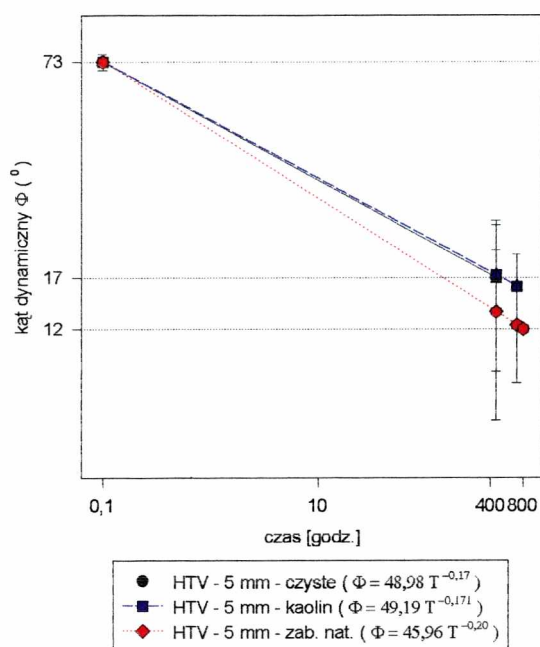
Na rysunkach 7.6.5 -7.6.7 przedstawiono wyniki badań gum silikonowych na wykresach przy logarytmicznej skali czasu. Obliczone zależności odpowiadają warunkom intensywnego zwilżania powierzchni elastomerów silikonowych oraz okresowej regeneracji w temp. 40° C przy czystych bądź zabrudzonych powierzchniach.



Rys. 7.6.5. Przebieg utraty i odzysku hydrofobowości przez materiał RTV w teście wody.



Rys. 7.6.6. Przebieg utraty i odzysku hydrofobowości przez materiał HTV o grubości 3 mm w teście wody.



Rys. 7.6.7. Przebieg utraty i odzysku hydrofobowości przez materiał HTV o grubości 5 mm w teście wody.

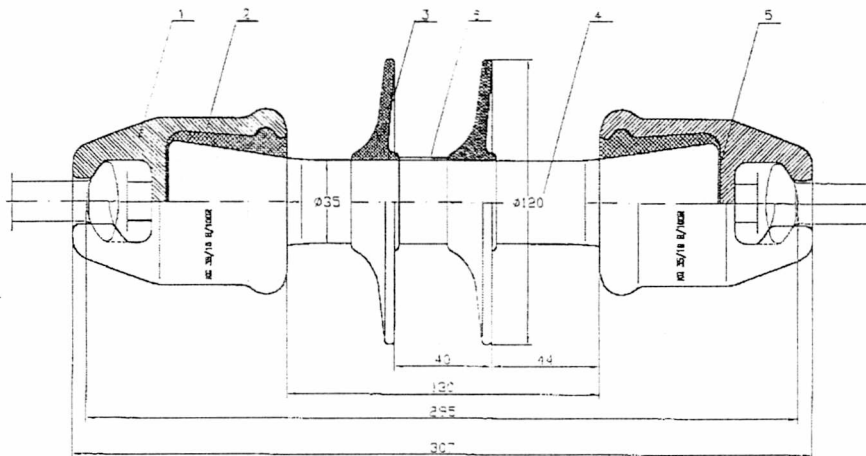
7.6.2. Podsumowanie wyników.

Przedstawione wyniki wskazują, że wybrane do badań gumy HTV i RTV w różnym stopniu regenerują swoje właściwości hydrofobowe po długotrwałym moczeniu w wodzie dejonizowanej. Przebieg procesu regeneracji, według przyjętej metody, zależał nie tylko od grubości gumy, ale także od jej rodzaju i typu powierzchniowych zanieczyszczeń. W szczególności stwierdzono, że:

- Próbkki czyste regenerują swoje właściwości hydrofobowe o wiele mniej efektywnie niż próbki zanieczyszczone suchym pyłem pochodzenia sztucznego lub naturalnego. Jest to ważne, ponieważ praktycznie zawsze odzysk hydrofobowości odbywa się w obecności opadu zabrudzeń, a w przypadku nowoczesnych gum silikonowych fakt ten przyczynia się do wzrostu efektywności procesu regeneracji.
- Z porównania wykresów wynika, że oba rodzaje gumy zachowują się odmiennie zwłaszcza podczas odzysku hydrofobowości. Podczas gdy materiał HTV praktycznie nie hydrofobizował warstwy sztucznego zabrudzenia to próbki materiału RTV wykazały się dużą efektywnością regeneracji hydrofobowości niezależnie od ich grubości. Fakt efektywnej regeneracji właściwości hydrofobowych gumy w obecności sztucznych zanieczyszczeń nie musi więc oznaczać podobnego przebiegu procesu w obecności zanieczyszczeń naturalnych i odwrotnie.

8. Praktyczne wykorzystanie wyników badań gum silikonowych. Konstrukcja izolatora hybrydowego.

Wyniki badania gum silikonowych RTV i HTV uzyskane w tej pracy wykorzystano do skonstruowania izolatora hybrydowego do linii elektroenergetycznych 15 kV przechodzących przez tereny o ekstremalnie trudnych warunkach środowiskowych i zabrudzeniowych [88,89]. Celem tych badań było określenie przydatności wybranych gum silikonowych na elementy konstrukcji izolatora oraz stwierdzenie potrzeby (lub jej braku) stosowania obu typów gum w takich konstrukcjach. Na rys. 8.1 przedstawiono izolator liniowy hybrydowy typu LPH 35/2, którego klosze wykonane są z gumy silikonowej HTV, a odcinek ceramicznego pnia między kloszami jest pokryty powłoką z elastomeru silikonowego RTV.



Rys 8.1 Izolator liniowy hybrydowy typu LPH 35/2 [88,89].

1. Kołpak gniazdowy,
2. Spoiwo,
3. Klosze,
4. Rdzeń ceramiczny,
5. Podkładka,
6. Powłoka z gumy silikonowej RTV.

W przypadku gumy silikonowej przewidzianej do zastosowania na klosze izolatora hybrydowego za najważniejsze właściwości decydujące o jakości kloszy uznano:

- dużą odporność na wyładowania elektryczne łuków cząstkowych w warunkach zawilgocenia i w obecności zanieczyszczeń,
- niską zwilżalność powierzchni i zdolność jej regeneracji w stanie czystym,
- odporność na działanie promieniowania UV,
- odporność na wyładowania koronowe,

natomiast za najważniejsze dla jakości osłony rdzenia ceramicznego uznano:

- długotrwałą odporność na działanie pola elektrycznego i prądu upływu oraz wyładowań iskrowych.
- niską zwilżalność powierzchni i zdolność jej regeneracji zwłaszcza w obecności zanieczyszczeń.
- odporność na wyładowania koronowe.

Mając na uwadze właściwości gum decydujące zdaniem Autora, o jakości kloszy i powłoki na pniu izolatora uznano, że w przypadku badanej gumy silikonowej HTV za najbardziej reprezentatywne mogą uchodzić wyniki:

- zmodyfikowanego testu pochyłej próbki (podrozdział 7.4),
- badania gumy w komorze klimatycznej (podrozdział 7.5),
- badania gumy przez zanurzenie w wodzie (podrozdział 7.6)

oraz

- badania wyładowaniem ulotowym w obecności wody (podrozdział 7.3)

natomiast w przypadku powłoki z gumy silikonowej RTV za najbardziej reprezentatywne uznano wyniki:

- badania gumy metodą koła śladu pełznego lub erozji (podrozdział 7.2),
- badania hydrofobowości i zdolności regeneracji hydrofobowości gumy w obecności różnych powierzchniowych zanieczyszczeniach (podrozdział 7.6)

oraz

- badania wyładowaniem ulotowym w obecności wody (podrozdział 7.3).

Wyniki badania gum silikonowych RTV i HTV zostały szczegółowo opisane w odpowiednich podrozdziałach i dlatego tutaj zostanie dokonane jedynie ich krótkie podsumowanie.

Wyniki badań zmodyfikowaną metodą pochyłej próbki pokazały, że gumy silikonowe HTV i RTV ulegają erozji w odmienny sposób na co wskazują ślady erozyjne o różnej postaci. Może mieć to związek z rozwojem prądów upływu na powierzchni gum, który na gumie HTV stabilizuje się szybko na poziomie 5-10 mA i pozostaje na tym poziomie przez kilkadziesiąt godzin. Natomiast w przypadku gumy RTV obserwuje się stały wzrost prądu i w konsekwencji głęboki ślad erozyjny. Mając także na uwadze wyniki badań gumy HTV w komorze klimatycznej oraz jej dobre właściwości hydrofobowe zwłaszcza w stanie czystym uznano, że może ona być wykorzystana na klosze izolatora hybrydowego.

W przypadku materiału na osłonę rdzenia ceramicznego uznano, że rozstrzygające znaczenie powinny mieć wyniki z badań metodą koła śladu pełznego lub erozji. W wyniku tych badań stwierdzono, że guma silikonowa RTV skutecznie tłumí rozwój prądów upływu

także w obecności pola elektrycznego, którego natężenie przekraczało kilkakrotnie wartości spotykane podczas eksploatacji w warunkach terenowych. Jednocześnie z innych badań opisanych w tej pracy wynikało, że guma ta szybko regeneruje niską zwilżalność w stanie zabrudzenia i po długotrwałym zawilgoceniu.

Uznano więc, że na powierzchnię chronioną od bezpośredniego oddziaływania opadów i o ograniczonej samooczyszczalności, jaką jest powierzchnia odcinka pnia między kłoszami, dobrze nadaje się guma silikonowa RTV.

Oceniając wykorzystanie w pracy metody badań gum HTV i RTV z punktu widzenia potrzeb konstrukcji izolatora hybrydowego można zauważyć, że uzyskane za ich pomocą wyniki pozwoliły na stwierdzenie wyraźnego zróżnicowania właściwości badanych gum i ich uzasadniony dobór na poszczególne elementy izolatora. Można zauważyć, analizując przedstawione w pracy wyniki badań, że zastosowanie tylko jednego typu gumy spowodowałoby istotne wady w konstrukcji izolatora. Na przykład badana guma silikonowa HTV jako osłona odcinka pnia między kłoszami w warunkach występującej tam słabej samooczyszczalności nie była by w stanie skutecznie hydrofobizować powierzchniowych zanieczyszczeń co ułatwiłoby rozwój prądów upływu zwłaszcza w obecności zawilgocenia. Podobnie wykonanie kłoszy z badanej gumy RTV bardzo ograniczyłoby czas eksploatacji izolatora z uwagi na mniejszą odporność tej gumy na wyładowania elektryczne w formie łuków cząstkowych i stwierdzony typ erozji.

Należy jeszcze zaznaczyć, że tak przeprowadzony dobór, gum a zwłaszcza jego praktyczne wykorzystanie podczas konstrukcji izolatora hybrydowego mają znamiona oryginalności i są przedmiotem zgłoszenia patentowego [87].

9. Degradacja gumy silikonowej w aspekcie przeskoku zabrudzeniowego.

9.1. Specyfika wyładowania zabrudzeniowego na izolatorze kompozytowym.

Głównym czynnikiem wpływającym na rozwój wyładowania zabrudzeniowego wzdłuż powierzchni izolatora tradycyjnego jest akumulacja zanieczyszczeń, które po zwilżeniu mżawką lub w wyniku opadu deszczu stają się źródłem powstania elektrolitu umożliwiającego przepływ dużych prądów upływu. Stopniowa akumulacja zanieczyszczeń na powierzchni izolatorów jest obserwowana zwłaszcza na terenach o dużym uprzemysłowieniu, silnie zurbanizowanych, gdzie dominuje tak zwany przemysł ciężki. Mechanizm występowania przeskoku zabrudzeniowego związany ze stopniową akumulacją powierzchniowych zanieczyszczeń na izolatorach dominuje również na terenach pustynnych i półpustynnych.

Niezwyczajnie silnym narażeniem eksploatacyjnym dla izolatorów elektroenergetycznych jest także nagłe wystąpienie mżawki, mgły lub opadów atmosferycznych o dużej przewodności. W tym przypadku do wystąpienia przeskoku zabrudzeniowego nie jest potrzebna powierzchniowa warstwa zakumulowanych zanieczyszczeń, a przeskoczyć może na izolatorze pozornie czystym. Źródłem wysokoprzewodzącej mżawki mogą być gazy pochodzące z szybów wentylacyjnych kopalń, kwaśne deszcze oraz mgły z nad terenów nadmorskich.

W każdym z tych dwóch przypadków musi powstać powłoka elektrolityczna o odpowiednio małej rezystancji. Rozkład przewodności lokalnych powłoki jest zwykle silnie nierównomierny co jest warunkowane rozkładem zakumulowanej warstwy zanieczyszczeń i konstrukcją izolatora.

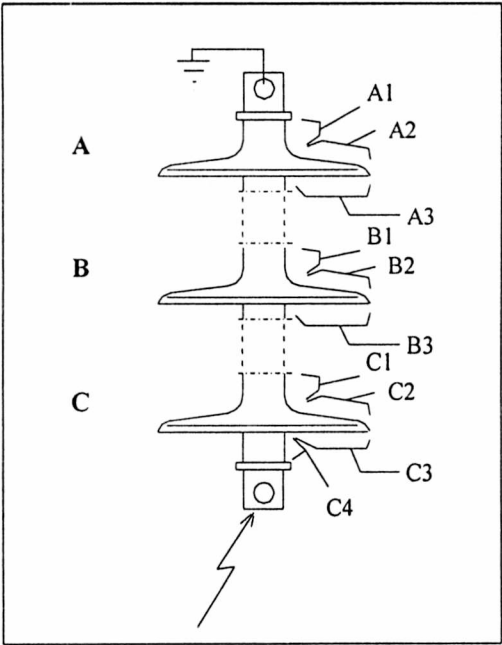
W tabeli 9.1.1 przedstawiono wyniki pomiarów przewodności warstwy na elementach powierzchni izolatora kompozytowego o praktycznie zwilżalnej powierzchni wykonane sondą paskową [63]. Tabelę uzupełnia rysunek 9.1.1, na którym schematycznie wskazano badane powierzchnie.

Jak wynika z przedstawionych pomiarów, pomimo prawie 20 letniej eksploatacji izolatora kompozytowego w warunkach silnych zanieczyszczeń w Terenowej Stacji Badań Zabrudzeniowych Izolatorów elektroenergetycznych (TSBZ) [71] i znacznej utracie hydrofobowości powierzchni przewodności powłoki są niewielkie.

Wydaje się więc, że podstawowym mechanizmem przeskoku zabrudzeniowego na izolatorze kompozytowym może być mechanizm związany z wystąpieniem wysokoprzewodzącej mgły – kondensującej na powierzchni izolatora -

Badany obszar wg rys. 9.1.1	Izolator w osłonie z gumy silikonowej RTV po 19 latach eksploatacji	
	Średnia wartość dynamicznego kąta zwilżania	Średnia wartość konduktywności warstwy zabrudzeń – κ
A1	~ 15°	~ 8 μ S
A2	~ 15°	~ 8 μ S
A3	~ 25°	~ 9 μ S
B1	~ 28°	~ 8 μ S
B2	~ 20°	~ 9 μ S
B3	~ 25°	~ 14 μ S
C1	~ 28°	~ 8 μ S
C2	~ 20°	~ 16 μ S
C3	~ 7°	~ 15 μ S
C4	~ 7°	~ 20 μ S

Tabela 9.1.1. Zestawienie wyników pomiarów konduktywności warstwy zanieczyszczeń oraz dynamicznych kątów zwilżania na wybranych elementach powierzchni izolatora przedstawionych na rysunku 9.1.1.

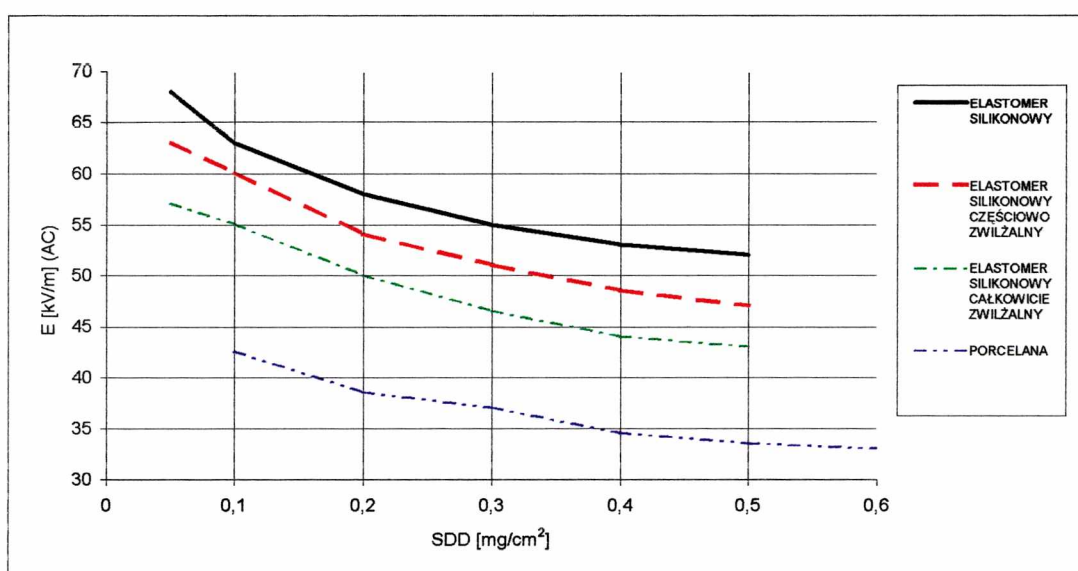


Rys.9.1.1. Wyselekcjonowane obszary powierzchni izolatora, dla których dokonano pomiarów konduktywności i zwilżalności przedstawionych w tabeli 8.1.1

mżawki lub opadu deszczu. Wieloletnie badania samooczyszczalności izolatorów w TSBZ, w warunkach występowania silnego opadu pyłu, zwłaszcza w latach 1980-1993, wykazały że akumulacja zanieczyszczeń dotyczy przede wszystkim izolatorów tradycyjnych [35]. W przypadku izolatorów kompozytowych fakt niewielkiej akumulacji zanieczyszczeń mógł wynikać zarówno ze zdolności ich powierzchni do hydrofobizacji zanieczyszczeń jak

również drgań elastycznej konstrukcji takich izolatorów spowodowanych wiatrem oraz bardziej aerodynamicznego kształtu w stosunku do izolatorów długopniowych.

Można zauważyć, że konstrukcje długopniowe izolatorów tradycyjnych charakteryzują się większą średnicą pnia w porównaniu do izolatorów wykonanych z gum silikonowych. Większa średnica pnia pogarsza samooczyszczalność izolatora długopniowego i umożliwia przepływ większego prądu upływu, a tym samym sprzyja obniżeniu wartości napięcia przeskoku. Wyższe napięcie przeskoku długopniowego izolatora kompozytowego – nawet całkowicie zwilżalnego – w porównaniu do izolatora klasycznego przy jednakowej długości drogi upływu stanowi więc istotną jego zaletę (rys.9.1.2).



Rys.9.1.2. Wykres zależności rozkładu napięcia przeskoku zabrudzeniowego od gęstości osadu soli SDD dla długopniowych izolatorów ceramicznych i kompozytowych [11].

Na rysunku 9.1.2 przedstawiono zależność rozkładu napięcia przeskoku zabrudzeniowego od gęstości osadu soli SDD dla długopniowych izolatorów ceramicznych i kompozytowych w różnym stanie zwilżalności ich powierzchni. Badania wykonano metodą warstwy stałej stosując niestandardowy sposób nakładania sztucznych zanieczyszczeń na powierzchnię izolatora kompozytowego [11].

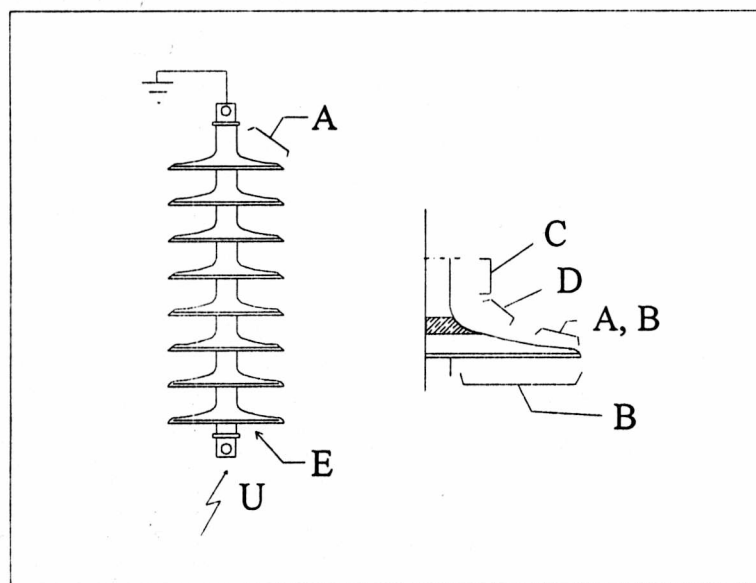
Z krzywych przedstawionych na rysunku 9.1.2 wynika, że w warunkach eksploatacyjnych przy niskiej zwilżalności izolatora kompozytowego przeskok zabrudzeniowy jest praktycznie niemożliwy ponieważ jego wytrzymałość zabrudzeniowa jest o około 50% wyższa od wytrzymałości izolatora ceramicznego stosowanego przy tym samym napięciu (ta sama droga upływu i długość części izolacyjnej). W stanie hydrofilnym wytrzymałość zabrudzeniowa izolatora kompozytowego w dalszym ciągu przewyższa co najmniej o 25% wytrzymałość izolatora ceramicznego. W pracach [50,57,74] natężenie pola warunkujące

wystąpienie przeskoku zabrudzeniowego na izolatorze kompozytowym oszacowano nawet jako 0,8-1,4 kV/cm. Podczas gdy na izolatorach liniowych eksploatowanych w sieciach natężenie pola (liczone w stosunku do najwyższego napięcia sieci i długości drogi upływu izolatora) jest zwykle rzędu 0,3-0,5 kV/cm. Jednak przeskoki zabrudzeniowe są niekiedy rejestrowane na izolatorach kompozytowych po wieloletniej eksploatacji i nie różnią się w zasadniczy sposób od obserwowanych na izolatorach tradycyjnych [106]. Wynika stąd, że przeskok zabrudzeniowy na izolatorze kompozytowym może wystąpić jedynie w warunkach dużego wzrostu zwilżalności jego powierzchni (rys. 9.1.2) szczególnie gdy lokalnie spowoduje to wzrost nierównomierności pola elektrycznego, a w konsekwencji obniżenie napięcia przeskoku zabrudzeniowego.

W dalszej części tego rozdziału przeanalizowano możliwość wystąpienia przeskoku zabrudzeniowego na izolatorze kompozytowym biorąc pod uwagę zarówno realistyczne wielkości natężenia pola jak i uzyskane wyniki badań materiałowych i terenowych.

9.2. Wyniki badań i obliczeń stanu zwilżalności powierzchni izolatorów kompozytowych z eksploatacji.

Na rysunku 9.2.1 przedstawiono wyselekcjonowane obszary izolatora dla których dokonano pomiarów i obliczeń dynamicznych kątów zwilżania.



Rys.9.2.1. Wyselekcjonowane obszary izolatora, dla których dokonano obliczeń i pomiarów dynamicznych kątów zwilżania przedstawionych w tabeli 9.2.1 przy wykorzystaniu zależności z tabeli 9.2.2.

Taki wybór obszarów podyktowany został wcześniej przeprowadzoną analizą utraty hydrofobowości na izolatorach kompozytowych (rozdział 4), z której wynikało, że elementy ich powierzchni są narażane w różny sposób podczas eksploatacji. Tak więc w

różnym tempie będzie zachodzić lokalna degradacja elementów powierzchni izolatora połączona ze stopniowym wzrostem ich zwilżalności. I tak:

- Obszar A to górna powierzchnia klosza od konstrukcji uziemionej oraz krawędzie pozostałych kloszy gdzie dominującym oddziaływaniem degradującym powierzchnię gumy jest okresowe zwilżanie opadami deszczu i niszczący wpływ promieniowania UV. Narażenia te odwzorowano badaniami wybranych elastomerów silikonowych w komorze klimatycznej ATLAS.
- Obszar B to dolne, płaskie powierzchnie kloszy (rysunek 4.2.5) oraz ich górne krawędzie gdzie dominującym oddziaływaniem jest gromadząca się i długotrwale utrzymująca się woda (często w postaci kropel). Narażenia te odwzorowano badaniem elastomerów silikonowych przez długotrwałe zanurzenie gumy silikonowej w wodzie.
- Obszar C to powierzchnie odcinków pnia między kloszami chronione przed bezpośrednim oddziaływaniem opadów i promieniowaniem UV. Są one głównie narażane prądami upływu i wyładowaniami elektrycznymi zwłaszcza podczas okresów występowania kondensacji pary wodnej. Narażenia te zostały odwzorowane w teście koła śladu pełnego i erozji (RWDT).
- Obszar D to elementy powierzchni kloszy w pobliżu pnia często o stosunkowo dużym nachyleniu i słabej samooczyszczalności. W tych miejscach spotyka się na izolatorach kompozytowych po wieloletniej eksploatacji ślady erozyjne będące wynikiem oddziaływania łuków cząstkowych. Narażenia tego obszaru izolatora odwzorowano zmodyfikowanym testem pochyłej próbki.
- Obszar E to powierzchnie w otoczeniu przewodu wysokiego napięcia narażone na oddziaływanie wyładowań ulotowych, które po wieloletniej eksploatacji są zwilżalne i posiadają zdolność akumulacji zabrudzeń. Narażenia te odwzorowano w badaniach oddziaływaniem wyładowania koronowego na powierzchnie gum silikonowych w obecności napływającej wody i zanieczyszczeń.

Należy jeszcze zaznaczyć, że narażenia górnej powierzchni pierwszego klosza izolatora kompozytowego od konstrukcji uziemionej oraz narażenia krawędzi pozostałych kloszy zostały odwzorowane wynikami starzenia czystych próbek z gum silikonowych. Powierzchnie te bowiem w wyniku oddziaływania opadów deszczu i wiatru na izolator w warunkach eksploatacji pozostają zwykle czyste. Natomiast narażenia obszarów izolatora o zwiększonej akumulacji zabrudzeń opisano zależnościami uzyskanymi podczas starzenia próbek gum silikonowych zanieczyszczonych zabrudzeniami naturalnymi lub sztucznymi.

Obszar A - górna powierzchnia klosza oraz krawędzie pozostałych kloszy [rys. 9.2.1]				
	RTV		HTV	
	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]
Komora klimatyczna "ATLAS"	$\Phi = 79,56 (t/x)^{-0,07}$	$x = (2,1 \cdot 10^4) T^{-7,6}$	$\Phi = 410,14 (t/x)^{-0,29}$	$x = 6,5 T^{-0,22}$
Obszar B - dolne powierzchnie kloszy oraz górne krawędzie [rys. 9.2.1]				
	RTV		HTV	
	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]
Test wody	$\Phi = 51,37 (t/x)^{-0,18}$	$x = (1,32 \cdot 10^4) T^{-1,46}$	$\Phi = 48,98 (t/x)^{-0,17}$	$x = (1,15 \cdot 10^4) T^{-0,45}$
Obszar C - pień [rys. 9.2.1]				
	RTV		HTV	
	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]
RWDT	$\Phi = 57,89 (t/x)^{-0,13}$	$x = (0,55 \cdot 10^3) T^{-0,26}$	$\Phi = 54,98 (t/x)^{-0,13}$	$x = (8,8 \cdot 10^3) T^{-1,61}$
Obszar D [rys. 9.2.1]				
	RTV		HTV	
	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]
Test pochyłej próbki	$\Phi = 23,14 (t/x)^{-0,53}$	$x = (3,22 \cdot 10^4) T^{0,54}$	$\Phi = 25,97 (t/x)^{-0,43}$	$x = (5 \cdot 10^4) T^{0,52}$
Obszar E [rys. 9.2.1]				
	RTV		HTV	
	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]	zależność matematyczna	współczynnik przyspieszenia [x]
Test wył. koronowego	$\Phi = 34,41 (t/x)^{-0,27}$	$x = (1,8 \cdot 10^4) T^{-2,46}$	$\Phi = 13,74 (t/x)^{-0,32}$	$x = (2,4 \cdot 10^5) T^{-1,43}$

Tabela 9.2.1. Zestawienie zależności matematycznych opisujących proces starzenia w poszczególnych eksperymentach oraz odpowiadających im współczynników przyspieszenia w odniesieniu do wyselekcjonowanych obszarów na rys. 9.2.1; Φ -dynamiczny kąt zwilżania, t -czas starzenia [godz.]; T -czas eksploatacji [lata].

W tabeli 9.2.1 zestawiono zależności matematyczne opisujące proces degradacji gum w przeprowadzonych eksperymentach starzeniowych oraz szacunkowe współczynniki przyspieszenia starzenia uzyskane na podstawie odniesienia wyników badań laboratoryjnych do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych (III-IV strefa zabrudzeniowa) i klimatycznych w kraju.

Przykładowy sposób szacunkowego obliczenia zwilżalności izolatora kompozytowego z gumy silikonowej HTV w obszarze E po 20 latach eksploatacji przedstawiono poniżej:

$x = (2,4 \cdot 10^5) T^{-1,43}$ – współczynnik przyspieszenia;

$\Phi = 13,74 (t/x)^{-0,32}$ – oczekiwana zwilżalność w obszarze E po eksploatacji;

$x = (2,4 \cdot 10^5) (20)^{-1,43}$ gdzie $T = 20$ lat;

$x \approx 3309$

$\Phi = 13,74 \left(\frac{20 \cdot 365 \cdot 24}{3309} \right)^{-0,32}$ gdzie $t = 20$ lat $\cdot 365$ dni $\cdot 24$ godziny;

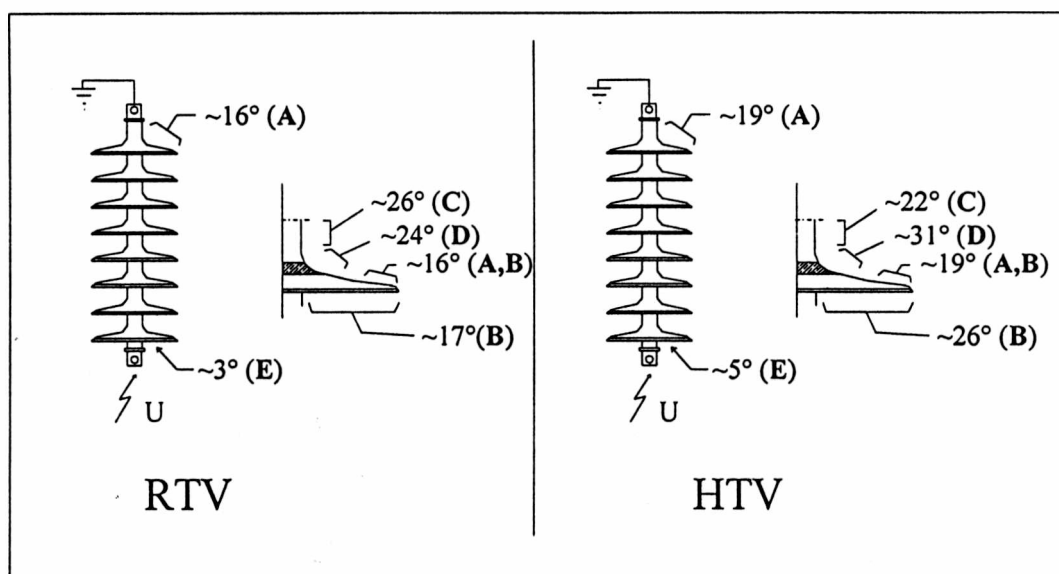
$\Phi \approx 4^\circ$

Czas eksploatacji badany obszar wg rys. 9.2.1	izolator HTV po 1 roku eksploatacji		izolator HTV po 3 latach eksploatacji [85]		izolator HTV po 3 latach eksploatacji	
	wartości zmierzone	wartości obliczone	wartości zmierzone	wartości obliczone	wartości zmierzone	wartości obliczone
A	~ 50	~ 51	~ 45	~ 38	~ 40	~ 38
B	~ 50	~ 50	~ 50	~ 34	~ 38	~ 34
C	~ 50	~ 55	~ 40	~ 38	~ 42	~ 38
D	~ 60	~ 55	~ 60	~ 44	~ 48	~ 44
E	~ 45	~ 40	~ 15	~ 17	~ 20	~ 17
Czas eksploatacji/ badany obszar wg rys. 9.2.1	izolator ceramiczny pokryty gumą RTV po 6 latach eksploatacji		izolator RTV po 6 latach eksploatacji		izolator RTV po 19 latach eksploatacji	
	wartości zmierzone	wartości obliczone	wartości zmierzone	wartości obliczone	wartości zmierzone	wartości obliczone
A	~ 20	~ 22	~ 15	~ 22	~ 15	~ 16
B	~ 23	~ 25	~ 25	~ 25	~ 15	~ 15
C	~ 30	~ 30	~ 30	~ 30	~ 25	~ 25
D	~ 27	~ 30	~ 30	~ 30	~ 22	~ 23
E	~ 14	~ 5	~ 10	~ 5	~ 5	~ 3

Tabela 9.2.2. Zestawienie wyników obliczeń dynamicznych kątów zwilżania z wynikami pomiarów dokonanych na powierzchni izolatorów po różnym okresie eksploatacji (wartości średnie).

W tabeli 9.2.2 dokonano zestawienia wyników pomiarów i obliczeń zmian zwilżalności dla izolatorów z gum silikonowych RTV i HTV dokonanych w oparciu o pomiary wykonane na stacji TSBZ w Hucie Miedzi „Głogów I” i zależności podane w tabeli 9.2.1. Z danych przedstawionych w tabeli 9.2.2 wynika, że utrata hydrofobowości na izolatorach jest duża w początkowym okresie eksploatacji, a najszybciej zwilżalność rośnie w pobliżu okuć izolatora. Natomiast resztkowa hydrofobowość jest zachowana w obszarach C i D. W tym zakresie też występuje największa rozbieżność między wynikami pomiarów i obliczeń, które dają zwykle oszacowania niższe niż wynikające z pomiarów. Może to wynikać z większego niż zakładano w eksperymentach efektu regeneracji hydrofobowości gum w obszarach C i D w warunkach eksploatacyjnych bądź zbyt konserwatywnie przyjętych wartości narażeń w testach laboratoryjnych.

Na rysunku 9.2.2 przedstawiono rozkłady zwilżalności na hipotetycznych izolatorach kompozytowych z gum silikonowych RTV i HTV po 15 latach eksploatacji.



Rys.9.2.2. Hipotetyczna zwilżalność na izolatorach z gum silikonowych RTV i HTV po 15 latach eksploatacji.

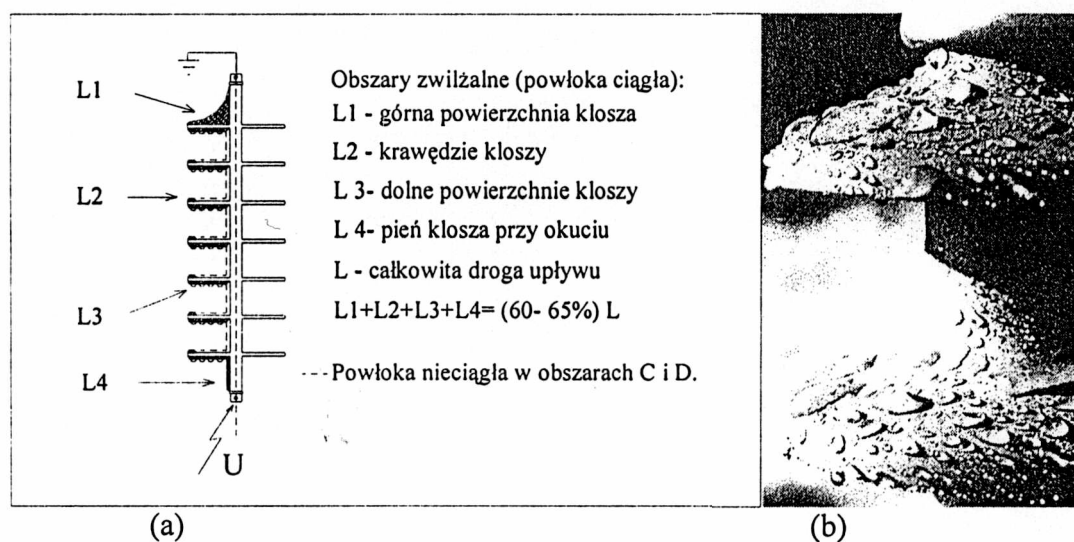
Jak wynika z symulowanych rozkładów zwilżalności przedstawionych na rysunku 9.2.2 można oczekiwać, że w wyniku 15 letniej eksploatacji izolatorów kompozytowych reszkowa hydrofobowość powierzchni zostanie zachowana głównie w obszarach C i D. Zwilżalność podana na rysunku 9.2.2 może być w tych obszarach nieco niższa co zaznaczono omawiając wyniki podane w tabeli 9.2.2. Wynika stąd dalej, że o wytrzymałości zabrudzeniowej izolatora kompozytowego po wieloletniej eksploatacji będzie decydować zarówno reszkowa zwilżalność w obszarach C i D jak i zdolność do utrzymywania wody (elektrolitu) przez obszary zwilżalne A,B i E. W przypadku więc intensywnego zwilżania wodą takiego izolatora można oczekiwać, że na obszarach zwilżalnych utworzy się ciągła powłoka wodna natomiast obszary C i D mogą być tylko miejscowo zwilżalne. W tabeli 9.2.3 zestawiono szacunkowe grubości warstw wody utrzymującej się na powierzchni izolatora z gumy silikonowej RTV po 19 letnim okresie eksploatacji poddanego intensywnemu zawilgoceniu wodą przez natryskiwanie. Grubość powłoki wody oszacowano na podstawie wagi sączków w stanie suchym i po zebraniu wody z określonych powierzchni oraz w oparciu o wyniki badań metodą RWDT -

Powierzchnia izolatora	Grubość warstwy elektrolitu h	Uwagi
Górna powierzchnia klosza	50 - 100 μm	brak kropel - powierzchnia zwilżalna
	100 - 200 μm	obecność kropel na powierzchni
Dolna powierzchnia klosza	200 - 400 μm	obecność kropel jak na rys. 4.2.5
Powierzchnia pnia	około 40 μm	obliczona w oparciu o wyniki testu RWDT

Tabela 9.2.3. Grubość warstwy elektrolitu na poszczególnych elementach powierzchni izolatora kompozytowego.

(rozdz. 7.2). Można więc przyjąć na podstawie wyników z tabeli 9.2.3, że na izolatorze kompozytowym z uwagi na proces degradacji powierzchni i cechy konstrukcji utworzy się gruba powłoka (ciągła powłoka z kroplami) wody na dolnych powierzchniach kloszy i w otoczeniach okuć (A,B i E) oraz cienka powłoka wody (powłoka nieciągła) w obszarach C i D.

Na rysunku 9.2.3 przedstawiono hipotetyczny rozkład zwilżalności na izolatorze kompozytowym po wieloletniej eksploatacji oparty o przeprowadzoną analizę. Do dalszych celów obliczeniowych przyjęto w uproszczeniu analizować jedynie dwie powłoki na izolatorze - jedna o grubości $50\ \mu\text{m}$, która może być nieciągła i druga o grubości $150\ \mu\text{m}$, która jest ciągła i umożliwia podtrzymanie rozwoju łuków cząstkowych po zapłonie.



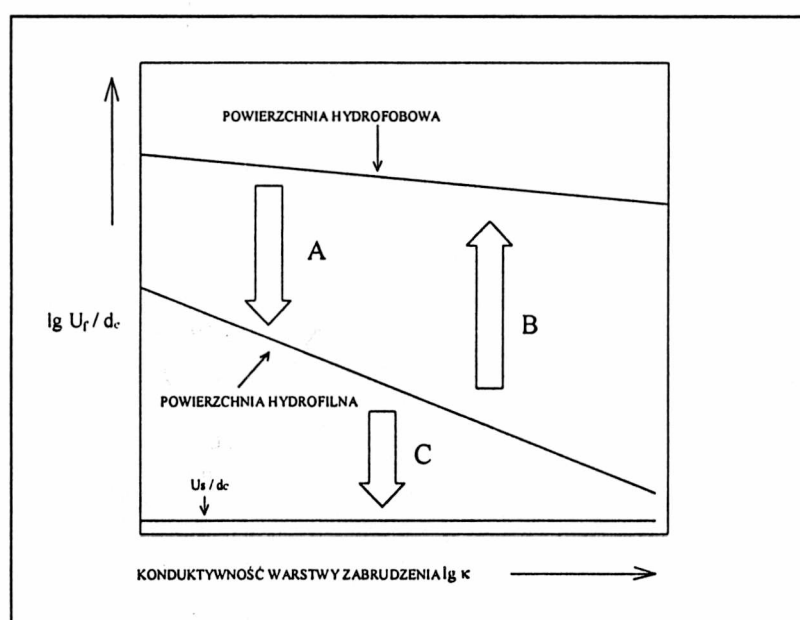
Rys.9.2.3. Hipotetyczny rozkład powłok elektrolitycznych na izolatorze kompozytowym po wieloletniej eksploatacji (a). Nieciągła warstwa wody na izolatorze z gumy silikonowej RTV po 19 latach eksploatacji w obszarach C i D (obszar C i D wg rys. 9.2.1)(b).

Jak wynika z przeprowadzonych analiz (rysunek 9.2.3) gruba powłoka wodna może się utrzymywać na co najmniej 50-60% powierzchni izolatora kompozytowego po wieloletniej eksploatacji, a w przypadku izolatorów z całkiem płaskimi kloszami na jeszcze większym obszarze. Jest to o tyle istotne, że grubość powłoki wodnej z uwagi na specyfikę powierzchni izolatora kompozytowego będzie decydować o poziomie konduktywności powłoki (zależność 7.3) w większym stopniu niż zakumulowana i shydrofobizowana warstwa zanieczyszczeń (tabela 9.1.1).

9.3. Mechanizm przeskoku zabrudzeniowego wzdłuż nierównomiernie zwilżalnej powierzchni izolatora kompozytowego.

Dotychczas przedstawione w literaturze modele przeskoku zabrudzeniowego na izolatorach kompozytowych oraz wyniki laboratoryjnych badań wytrzymałości zabrudzeniowej takich izolatorów pokazują, że przeskok musiałby zachodzić przy natężeniu pola elektrycznego wyższym niż spotykane w eksploatacji [50,74]. Jest to niezgodne z samą istotą przeskoku zabrudzeniowego, który występuje na izolatorach tradycyjnych przy napięciach roboczych [69,70]. Podobnie jest w przypadku izolatorów kompozytowych, na których przeskoki zabrudzeniowe są niekiedy obserwowane po okresie wieloletniej eksploatacji [106]. Próbuje się dlatego wyjaśnić zainicjowanie przeskoku zabrudzeniowego występowaniem uderzeń łączeniowych lub opadaniem kropli z brzegów kloszy.

Zjawiska te mogą obniżyć wytrzymałość zabrudzeniową izolatora w zakresie 10-20% co nie ma jednak zasadniczego wpływu na wielkości natężeń pól, przy których przeskoki mogą być rejestrowane (rysunek 9.1.2). Wydaje się więc, że bez założenia istotnego wzrostu zwilżalności powierzchni izolatora kompozytowego nie da się przedstawić spójnego mechanizmu przeskoku zachodzącego w warunkach eksploatacyjnych.



Rys.9.3.1. Wykres zależności napięcia przeskoku $\lg U_f/d_c$ od konduktywności warstwy zabrudzeń $\lg \kappa$ na powierzchni izolatora kompozytowego [75];
 A- utrata niskiej zwilżalności, akumulacja zabrudzeń;
 B- regeneracja niskiej zwilżalności, hydrofobizacja zabrudzeń;
 C- głęboka degradacja materiału (erozja), brak możliwości regeneracji niskiej zwilżalności.

Na rysunku 9.3.1 przedstawiono wpływ stanu zwilżalności powierzchni izolatora kompozytowego na położenie jego charakterystyk zabrudzeniowych. Jak już zaznaczono i co także wynika z wykresów na rysunku 9.1.2 przeskok zabrudzeniowy na izolatorze kompozytowym będzie możliwy zwłaszcza przy silnym wzroście zwilżalności izolatora co spowoduje wzrost nachylenia charakterystyki zabrudzeniowej.

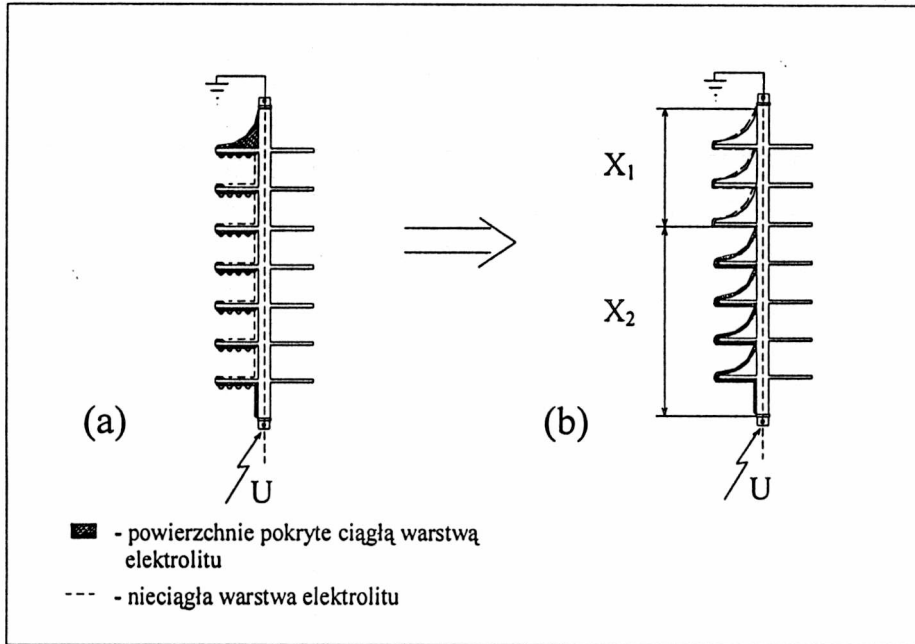
Mając na uwadze wyniki dotychczas przeprowadzonych w tej pracy badań i symulacji można zauważyć, że wzrost zwilżalności powierzchni izolatora kompozytowego będzie silnie niejednorodny co w efekcie spowoduje nierównomierność rozkładu pola elektrycznego z uwagi na różną upływność elementów powierzchni izolatora. Z drugiej strony jak pokazują wyniki badań przedstawione w tabeli 9.1.1 i dane literaturowe [35] rozkład zanieczyszczeń na izolatorze kompozytowym eksploatowanym przez wiele lat w obszarze silnych zabrudzeń jest quasi równomierny. Można więc oczekiwać w tych warunkach, że inicjacja i rozwój łuków cząstkowych będzie spowodowana nierównomiernym rozkładem powłoki elektrolitycznej. Przyjęto dlatego dalej analizować izolator z nierównomiernym rozkładem zwilżalności elementów powierzchni co wymusza tworzenie się nierównomiernej powłoki elektrolitycznej. Konduktywność tej powłoki może miejscowo wynikać ze stanu zanieczyszczenia powierzchni lub opadu mżawki, w wyniku którego powłoka ta została utworzona. Z uwagi jednak na hydrofobizację powierzchniowych zanieczyszczeń zasadnicze znaczenie dla wartości konduktywności będzie miała grubość powłoki (zależność 7.3).

W pracach [85,86] opisano mechanizm przeskoku zabrudzeniowego na nierównomiernie zabrudzonym izolatorze tradycyjnym oparty o zmodyfikowany model Obenaus [73].

Wykazano tam, że nierównomierny rozkład powłok zabrudzeniowych na izolatorze może spowodować obniżenie wytrzymałości zabrudzeniowej izolatora o około 40% w stosunku do wytrzymałości izolatora pokrytego powłoką równomierną. Przypadek ten ma miejsce wtedy gdy około 60% drogi upływu izolatora jest pokryte powłoką zabrudzeniową o większej grubości i konduktywności niż pozostała część izolatora. Z opisanych wcześniej badań i analiz wynikało, że na izolatorze kompozytowym z powodu lokalnych wzrostów zwilżalności powierzchni może zaistnieć taki przypadek rozłożenia powłoki elektrolitycznej (rysunek 9.2.3).

Postanowiono więc sprawdzić czy wytrzymałość zabrudzeniowa izolatora kompozytowego obliczona według tego mechanizmu umożliwi wytłumaczenie występowania przeskoków zabrudzeniowych w zakresie natężeń pól elektrycznych spotykanych w eksploatacji.

W tym celu przyjęto, że izolator kompozytowy jest pokryty nierównomierną powłoką zabrudzeniową o zmiennej grubości. Odcinek X_1 wzdłuż drogi upływu tego izolatora jest pokryty powłoką o rezystancji jednostkowej r_{h1} i grubości h_1 , a odcinek X_2 powłoką o parametrach r_{h2} i h_2 (rysunek 9.3.2).



Rys.9.3.2. Rzeczywisty (a) i przyjęty do obliczeń (b) rozkład powłoki zabrudzeniowej na izolatorze kompozytowym

W teorii przeskoku zabrudzeniowego uważa się, że sposób rozłożenia warstwy zabrudzeniowej nie ma zasadniczego wpływu na poziom wytrzymałości zabrudzeniowej izolatora o ile porównywalne odcinki drogi upływu izolatora są pokryte warstwą zabrudzeniową o podobnych parametrach [80].

Z tego względu na rysunku 9.3.2 przedstawiono rzeczywisty i zmodyfikowany do obliczeń (uproszczony) model rozkładu powłoki zabrudzeniowej na izolatorze kompozytowym.

W analizowanym modelu równanie prądów w chwili wystąpienia przeskoku zabrudzeniowego jest następujące [86] :

$$\left[\frac{n_1 \cdot A_1 \cdot X_{C1}}{r_{n1} \cdot (X_1 - X_{C1}) + r_{h2} \cdot X_2} \right]^{\frac{1}{1+n_1}} = \left(\frac{A_2}{r_{h2}} \right)^{\frac{1}{1+n_2}} \quad (9.1)$$

gdzie: X_{C1} – jest długością krytyczną łuku, który pali się na odcinku izolatora X_1 ,

n_1 , n_2 oraz A_1 i A_2 – są stałymi statycznej charakterystyki łuku.

Wprowadzając dodatkowo zależności:

$$s_1 = \frac{n_1}{1+n_1} \quad (9.2)$$

$$s_2 = \frac{n_2}{1 + n_2} \quad (9.3)$$

$$\beta = \frac{r_{h2}}{r_{h1}} = \frac{\kappa_{h1}}{\kappa_{h2}} \quad (9.4)$$

$$\alpha = \frac{A_1}{A_2} \approx 1 \quad (9.5)$$

$$\text{oraz} \quad \nu = \frac{n_1}{n_2} \quad (9.6)$$

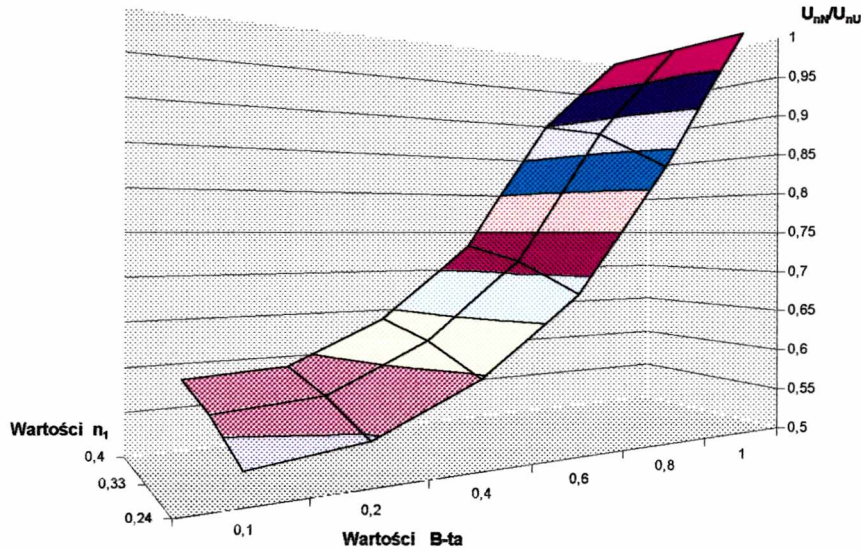
gdzie: s_1 i s_2 – są nachyleniami charakterystyk zabrudzeniowych izolatora pokrytego równomiernymi powłokami o parametrach odpowiednio h_1 , r_{h1} lub h_2 , r_{h2} ;

β – jest stosunkiem konduktywności powłok zabrudzeniowych na odcinkach X_1 i X_2 , odpowiednio κ_{h1} i κ_{h2} .

Po wykonaniu odpowiednich przekształceń otrzymuje się zależność na stosunek napięć przeskoku izolatora pokrytego powłoką nierównomierną U_{nN} do wytrzymałości przy zanieczyszczeniu warstwą równomierną U_{nU} [86]:

$$\frac{U_{nN}}{U_{nU}} \approx \frac{\left[\beta^{(s_2-s_1)} (1-\nu^2 \cdot \beta^2) - \beta^{(1-s_1)} \cdot (1-\nu) \right] \cdot \left[1 - \beta^2 + (1-\nu) \cdot \beta^{(s_2+1)} \right]^{s_1}}{\left[1 - \beta + (1-\nu \cdot \beta) \cdot \beta^{s_2} \right]^{(s_1+1)}} \quad (9.7)$$

Na rysunku 9.3.3 przedstawiono zależność U_{nN}/U_{nU} od β i n_1 .



Rys.9.3.3. Wykres zależności U_{nN}/U_{nU} od β i n_1 dla izolatora pokrytego nierównomierną powłoką o zmiennej grubości.

Na podstawie zależności 7.3 i biorąc pod uwagę zależność 9.4 możemy napisać:

$$\beta = \frac{\kappa_{h1}}{\kappa_{h2}} = \frac{h_1 \cdot \gamma_1}{h_2 \cdot \gamma_2} \quad (9.8)$$

Jeżeli warstwa zanieczyszczeń na izolatorze jest shydrofobizowana to konduktywności γ_1 i γ_2 nie różnią się istotnie stąd

$$\beta \approx \frac{h_1}{h_2} \quad (9.9)$$

Biorąc pod uwagę wyniki pomiarów grubości powłoki elektrolitu na izolatorze kompozytowym przedstawione w rozdziale 9.2 otrzymujemy :

$$\beta \approx \frac{50 \mu m}{150 \mu m} \approx 0,33 \quad (9.10)$$

Stałe n_1 i n_2 statycznej charakterystyki łuku są zwykle zawarte w przedziale od 0,24 do 1,3 co wynika z badań modelowych na izolatorach tradycyjnych jak i strugach elektrolitu [57]. W przypadku powierzchni hydrofobowych wartości n są małe ze względu na małe nachylenia charakterystyk zabrudzeniowych uzyskiwane w badaniach (rysunek 9.1.2). Z drugiej strony charakterystyki zabrudzeniowe izolatorów tradycyjnych w warunkach eksploatacyjnych mają zwykle nachylenie s nie przekraczające 0,5. Dlatego do dalszych obliczeń przyjęto dwie pary stałych n_1 i n_2 :

$n_1 = 0,24$ i $n_2 = 0,34$ lub $n_1 = 0,44$ i $n_2 = 0,54$, którym odpowiadają nachylenia $s_1 = 0,19$ i $s_2 = 0,25$ oraz $s_1 = 0,30$ i $s_2 = 0,35$.

Stosunek napięć U_{nN} / U_{nU} obliczono wykorzystując zależność 9.7

$$\frac{U_{nN}}{U_{nU}} \cong 0,58 \div 0,64 \quad (9.11)$$

Przy takim nachyleniu charakterystyk zabrudzeniowych napięcie przeskoku na powierzchni nierównomiernie zabrudzonego izolatora U_{nN} będzie odpowiadało około $0,58 \div 0,64 U_{nU}$ napięcia przeskoku izolatora równomiernie zabrudzonego.

Podana zależność stosunku napięcia przeskoku zabrudzeniowego przy obecności warstwy równomiernej i nierównomiernej umożliwia obliczenie stosunku średnich natężeń pola elektrycznego E_{nN} (w warstwie nierównomiernej o zmiennej grubości) do E_{nU} (w warstwie równomiernej) wg zależności:

$$\frac{U_{nN}}{U_{nU}} = \frac{\frac{U_{nN}}{L}}{\frac{U_{nU}}{L}} = \frac{E_{nN}}{E_{nU}} \quad (9.12)$$

stąd

$$\frac{E_{nN}}{E_{nU}} \cong 0,58 \div 0,64 \quad (9.13)$$

gdzie L w zależności 9.12 oznacza długość drogi upływu izolatora.

Analogicznie więc jak w przypadku stosunku napięć natężenie pola E_{nN} na powierzchni pokrytej warstwą nierównomierną o zmiennej grubości będzie odpowiadało $0,58-0,64 E_{nU}$ natężenia pola warstwy równomiernej.

Na rysunku 9.1.2 (rozdział 9.1) przedstawiono wykres zależności rozkładu natężenia pola elektrycznego E , przy którym następuje przeskok od gęstości osadu soli SDD dla izolatora w osłonie z elastomeru silikonowego i izolatora porcelanowego w obecności równomiernej warstwy zabrudzeń na ich powierzchniach. W przypadku izolatorów kompozytowych po pewnym okresie eksploatacji stan ich zwilżalności nie odpowiada stanowi pierwotnemu tzn. 100% hydrofobowości powierzchni. Sytuację taką odwzorowuje charakterystyka zależności E przeskoku od SDD dla elastomeru silikonowego częściowo zwilżalnego wrysowana pomiędzy charakterystykę materiału świeżego i całkowicie hydrofilnego. Odczytana wartość napięcia przeskoku dla gęstości osadu soli $SDD = 0,1 \text{ mg/cm}^2$, która przyjmowana była również w badaniach eksperymentalnych wynosi $E_{nU} = 0,6 \text{ kV/cm}$. Przy występowaniu wysokokonduktywnej mżawki wielkość SDD może być większa od tej, która została przyjęta.

Korzystając z zależności 9.12 po przekształceniu możemy obliczyć E_{nN}

$$E_{nN} \cong (0,58 \div 0,64) \cdot 0,6 \text{ kV/cm} \cong 0,35 \div 0,38 \text{ kV/cm} \quad (9.14)$$

Jak już zaznaczono wcześniej (rozdział 9.1) jednostkowe natężenie pola na izolatorach w eksploatacji wynosi $0,3-0,5 \text{ kV/cm}$ co dobrze odpowiada wartości obliczonej przy której może wystąpić przeskok zabrudzeniowy na izolatorze kompozytowym.

9.4. Podsumowanie.

W niniejszym rozdziale wykazano, że:

- Po wieloletnim okresie eksploatacji na izolatorze kompozytowym może wystąpić nierównomierny rozkład zwilżalności wzdłuż jego powierzchni (miejscu hydrofilne i miejsca z reszkową hydrofobowością). Pomimo tego o wytrzymałości zabrudzeniowej będzie decydować w większym stopniu opad wysokokonduktywnej mżawki niż zakumulowana warstwa zabrudzeń.

- W oparciu o badania laboratoryjne i terenowe można przewidzieć postać nierównomierności rozkład zwilżalności wzdłuż powierzchni izolatora kompozytowego.
- Wyniki obliczeń i przeprowadzonych symulacji wskazują, że po wieloletniej eksploatacji izolatora kompozytowego istnieje realna możliwość wystąpienia na jego powierzchni przeskoku zabrudzeniowego zgodnego z mechanizmem przeskoku Obenaus. Równocześnie jest to potwierdzeniem możliwości wystąpienia – w odpowiednich warunkach – „zwykłego” przeskoku zabrudzeniowego, którego mechanizm jest zbieżny z mechanizmem przeskoku na izolatorze tradycyjnym.

Powyższe stwierdzenia udowadniają tezę, że nierównomierność rozkładu zwilżalności na powierzchni izolatora kompozytowego spowodowana różnym stopniem zdegradowania materiału osłonowego może przyczynić się do powstania nierównomiernej warstwy elektrolitycznej o różnych konduktywnościach lokalnych, a w konsekwencji może doprowadzić do wystąpienia przeskoku zabrudzeniowego.

10. Podsumowanie końcowe.

Przedmiotem eksperymentalnego programu badawczego opisanego w niniejszej pracy było porównanie wyników degradacji dwóch typów elastomerów silikonowych HTV i RTV pochodzących od uznanych producentów, które wykorzystywane są jako materiały osłonowe izolatorów kompozytowych lub hydrofobowe pokrycia izolatorowe.

Tezy pracy zostały sformułowane na podstawie dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie degradacji gum silikonowych i przeskoku zbrudzeniowego izolatorów kompozytowych wynikającego z przeprowadzonych studiów literaturowych. W celu ich weryfikacji opracowano program badań laboratoryjnych, w którym zastosowane w poszczególnych eksperymentach narażenia zostały tak dobrane aby odnosiły się do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych izolatorów ze szczególnym uwzględnieniem warunków krajowych.

Przeprowadzono łącznie pięć różnych eksperymentów, z których część została uzupełniona badaniami składu chemicznego metodą spektroskopii w podczerwieni. Wyniki tych badań potwierdziły założenie, że proces degradacji elastomerów silikonowych zależy od rodzaju gum oraz sposobu ich narażania podczas starzenia. I tak w przypadku testu koła śladu pełnego i erozji (RWDT) oraz zmodyfikowanego testu pochyłej próbki rejestrowany w obecności działania wilgoci prąd upływu każdorazowo był wyższy dla gumy HTV, gdy tymczasem pokrycie RTV wykazywało się aktywną „obroną” przed wzrostem zwilżalności, a tym samym przed wzrostem prądu. Jednak wielogodzinny test pochyłej próbki wykazał, że w dłuższym spektrum czasowym pokrycie RTV szybciej ulega procesowi degradacji niż guma HTV, która okazała się bardziej odporna na działanie powierzchniowych wyładowań. Tworzenie się głębokich śladów erozyjnych w przypadku gumy silikonowej RTV było związane ze wzrostem częstości występowania w widmie prądu impulsów prądowych o wartościach 10 mA i więcej w miarę trwania eksperymentu co w niewielkim stopniu miało miejsce w przypadku widma prądu rejestrowanego na gumie HTV. Erozja powstająca na gumie RTV była ukierunkowana w głąb materiału co może wskazywać na lokalne kumulowanie energii wyładowań elektrycznych podczas gdy ślady powstające na materiale HTV były ukierunkowane powierzchniowo co może wskazywać na zdolność materiału do rozpraszania energii. Ponadto obecność zabrudzeń na powierzchni materiału RTV powodowała około 2-krotne przyspieszenie występowania śladów erozyjnych czego nie obserwowano w przypadku gumy HTV.

Równocześnie zaobserwowano – w przypadku RWDT i testu pochyłej próbki – odmienny kształt przebiegu rejestrowanego prądu. Dla próbek RTV były to pojedyncze impulsy, a dla próbek HTV przebieg ciągły. Potwierdza to spostrzeżenie o aktywnym tłumieniu prądu upływu przez elastomer RTV.

Natomiast test wyładowania koronowego wykazał mniejszy wzrost zwilżalności próbek RTV w stosunku do materiału HTV nawet po 2-krotnie dłuższym czasie starzenia (16 godzin-RTV, 8 godzin-HTV). Również regeneracja po etapie starzenia (temp. 40° C przez 200 godzin) wykazała lepsze właściwości pokrycia RTV. W przypadku obu gum zaobserwowano, że efektywność regeneracji była wyższa w obecności powierzchniowych zabrudzeń, przy czym elastomer HTV lepiej hydrofobizował zabrudzenia naturalne w stosunku do kaolinu. Większa zdolność do hydrofobizacji zabrudzenia naturalnego związana jest z porowatą budową pyłu naturalnego, dla którego wielkość por wynosi około 100 Å. Oznacza to występowanie większych sił kapilarnych odpowiedzialnych za „chłonięcie” frakcji niskomolekularnej z podłoża tzn. elastomeru silikonowego w porównaniu do zabrudzenia sztucznego (kaolinu z solą), dla którego wielkość porów wynosiła około 500 Å. Próbkę czyste obu materiałów tylko w niewielkim stopniu uległy regeneracji.

Powyższe wyniki znajdują potwierdzenie w teście długotrwałego oddziaływania wody, który również wykazał wzrost efektywności regeneracji w obecności powierzchniowych zabrudzeń. I w tym przypadku – dla próbek HTV – efektywność regeneracji była wyższa w obecności zabrudzenia naturalnego. Jest to ważne, ponieważ praktycznie zawsze odzysk hydrofobowości odbywa się w obecności opadu zabrudzeń.

Natomiast próba regeneracji obu badanych elastomerów po starzeniu w komorze klimatycznej wykazała tylko częściowy odzysk hydrofobowości w obecności zabrudzenia sztucznego – kaolinu z solą - co może wynikać z mniejszej powierzchni właściwej tego zabrudzenia. Dynamika wzrostu zwilżalności była wyższa w pierwszej części eksperymentu po czym – w przypadku tylko pokrycia RTV – obserwuje się niewielki wzrost hydrofobowości. Cieńsze próbki obu elastomerów wykazywały większą odporność na degradację co prawdopodobnie było związane z ich większą podatnością na nagrzewanie w warunkach przeprowadzonego eksperymentu, a w związku z tym ze zwiększoną dynamiką dyfuzji frakcji niskomolekularnych.

Spostrzeżenia te potwierdzają tezę, w której założono, że procesy degradacji gum silikonowych zależą od sposobu ich narażania podczas starzenia oraz rodzaju gum i ulegają zmianom w obecności powierzchniowych zanieczyszczeń, których właściwości

fizyczne wpływają na przebieg i dynamikę tych procesów, dlatego na podstawie wyników wybranych testów laboratoryjnych można przewidywać zachowanie się handlowo dostępnych gum silikonowych w różnych warunkach narażeń eksploatacyjnych.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można również rozróżnić właściwości handlowo dostępnych gum silikonowych jednak właściwe jest tutaj stosowanie grupy metod badawczych wymagających często odpowiedniej modyfikacji ponieważ wnioskowanie w oparciu o jeden test może być często nie wystarczające (komora klimatyczna, znormalizowany test pochyłej próbki).

Ponadto przedstawione wyniki stanowiły inspirację do stworzenia koncepcji izolatora hybrydowego, którego konstrukcja łączyłaby zalety obu opisanych materiałów. I tak materiał HTV lepiej nadawałby się na „otwarte” powierzchnie kloszy, które zwykle pozostają czyste i są narażone na działanie opadów. Natomiast elastomer RTV okazał się bardziej podatny na regenerację po działaniu wyładowania koronowego oraz posiadał lepszą zdolność do hydrofobizacji zabrudzeń i tym samym lepiej tłumi rozwój prądów upływu. Dlatego zdaniem autora bardziej nadaje się na nie narażane opadami powierzchnie tzn. dolne powierzchnie kloszy (wyładowanie koronowe – dolna powierzchnia klosza sąsiadująca z przewodem przesyłowym) oraz pień izolatora (koncentracja prądu upływu), które z kolei są bardziej podatne na akumulacje zabrudzeń.

Celem pracy było również zaproponowanie zastosowania serii wybranych eksperymentów do wstępnej selekcji wybranych elastomerów silikonowych wykorzystywanych jako materiał osłonowy izolatorów kompozytowych. Wykresy zmian zwilżalności gum silikonowych w skali logarytmicznej, w funkcji czasu, pokazują – przez wartość nachylenia krzywej – surowość przyjętej metody degradacji gumy. Porównanie skutków oddziaływania zastosowanej metody starzenia na powierzchni gumy, po zakończeniu badań laboratoryjnych, ze stanem zdegradowania powierzchni izolatora z eksploatacji umożliwia dobór intensywności narażeń w testach laboratoryjnych.

Na podstawie zebranych wyników badań terenowych oraz laboratoryjnych opracowano proste zależności matematyczne, które pozwalają na oszacowanie przybliżonego stanu wyselekcjonowanych powierzchni po określonym czasie eksploatacji. Uwzględnienie dominujących narażeń przy jakich miałyby być eksploatowane izolatory (np. promieniowanie UV – obszary nasłonecznione, pustynie) pozwoliłyby na taki dobór eksperymentów, których narażenia odpowiadały narażeniom rzeczywistym.

Wyniki pomiarów zwilżalności powierzchni izolatorów kompozytowych po wieloletniej eksploatacji wykazują występowanie nierównomiernego rozkładu stref hydrofilnych i

hydrofobowych, których obecność w warunkach nawilżania izolatora mżawką może doprowadzić do powstania powłok elektrolitu o różnej grubości co także jest warunkowane konstrukcją izolatora. Taki nierównomierny rozkład zwilżalności na izolatorze kompozytowym można szacunkowo określić po zadanym okresie eksploatacji na podstawie badań laboratoryjnych uwzględniających dominujące narażenia starzeniowe występujące w warunkach eksploatacji w miejscu zainstalowania izolatora.

Z uwagi na nierównomierność rozkładu powłoki elektrolitycznej na powierzchni izolatora kompozytowego po wieloletniej eksploatacji, do obliczeń wytrzymałości zabrudzeniowej wykorzystano zmodyfikowany model przeskoku zabrudzeniowego Obenausa wykazując możliwość wystąpienia przeskoku opisanego tym modelem, a tym samym fizyczne podobieństwo przeskoków zabrudzeniowych na izolatorach kompozytowych i tradycyjnych.

Można więc przyjąć, że w oparciu o wyniki badań terenowych i laboratoryjnych oraz modele zmian zwilżalności elementów powierzchni izolatora wykazano zasadność drugiej tezy pracy wykorzystując też do tego celu analizę obliczeniową możliwości wystąpienia przeskoku zabrudzeniowego wzdłuż nierównomiernie zabrudzonego izolatora kompozytowego.

11. Literatura.

- [1] Barsch R., Lambrecht J., Winter H.-J. - *On the Evaluation of Influences on the Hydrophobicity of Silicone Rubber Surfaces* - 10th International Symposium on High Voltage Engineering, August 25 - 29, Montreal, Quebec, Canada, 1997. s.13-16.
- [2] Barsch R., Lambrecht J., Winter H. -J., *On the valuation of the early aging period of polymer insulator surfaces during accelerated aging tests*, 9th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Graz 1995, paper 3023-1.
- [3] Barret E.P., Joyner L.G., Halenda V., *J. Amer. Chem. Soc.*, 73 (1951) 373-380.
- [4] Cherney E.A., Gorur R. S., *RTV Silicone Rubber Coatings for Outdoor Insulators*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, no. 5, 1999, s.605.
- [5] Cherney E.A., Hackam R., Kim S. H., *Porcelain Insulator Maintenance With RTV Silicone Rubber Coating*, IEEE Trans. PD, vol. 6, 1991, s. 1177-1181.
- [6] Cherney E.A., Kim S. H., Hackam R., *The Loss and Recovery of Hydrophobicity of RTV Silicone Rubber Insulators Coatings*, IEEE Trans. PD, vol. 5, no. 3, 1990, s. 1491.
- [7] Cherney E.A., Stonkus D. J., *Non-ceramic Insulator for Contaminated Environments*, IEEE Trans. on PAS, vol. 100, 1991, s. 131.
- [8] Chrzan K., Pohl Z., Kowalak T. - *Hygroscopic properties of Pollutants on HV Insulators*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.24, no. 1, February 1989, s. 107- 112.
- [9] Chrzan K., *Wpływ wybranych właściwości osadów naturalnie zabrudzonych izolatorów na prąd upływu i napięcie przeskoku*, Rozprawa doktorska; Politechnika Wrocławska. Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wrocław 1987.
- [10] Dane katalogowe.
- [11] De La O A., Gorur R. S., Chang J. - *AC Clean Fog Tests on Non-Ceramic Insulating Materials and a Comparasion with Porcelain*, IEEE Trans. PD. vol. 9, no. 4, 1994, s.2000-2007.
- [12] Deng H., Hackam R. - *Electrical Performance of RTV Silicone Rubber Coating of Different Thicknesses on Porcelain*, IEEE Trans. PD. vol. 12, 1997, s.857-866.
- [13] Dokumentacja techniczna komory klimatycznej ATLAS CI 65.
- [14] D4222-91, *Standard test method for determination of nitrgen adsorption and desoprption isotherm of catalyst by static volumetric measurements*, Annual Book of ASTM Standards, vol. 05.03 (1993).
- [15] D2303-79, *Liquid Contaminants, Incline Plate Tracking and Erosion of Insulating Materials*, Annual Book of ASTM Standards, Part 39, s.549-560.
- [16] D3663-92, *Standard test method for surface area of catalyst*, Annual Book of ASTM Standards. vol. 05.03 (1993).
- [17] D4641-87, *Standard Practice for calculation of pore size distribution of catalysts rom nitrogen desorption isotherms*, Annual Book of ASTM Standards, vol. 05.03 (1993).
- [18] *Excerpts from Presentation by Dr J. Kuffel* - Insulators News and Market Report, vol. 4, no. 1, 1996, s. 19-22,.
- [19] Fernando M. A. R. M., Gubański S. M. - *Leakage Currents on Non-ceramic Insulators and Materials* - IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999, s. 660 - 667.

- [20] Fleszyński J., Pohl Z., Wańkowicz J.G., Gubański S.M., Stankiewicz J., Winkler J., *Experience with application of polymeric materials to outdoor high-voltage insulators in Poland*, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 37th CIGRE Session, Paris, France 30th -August - 5th September 1998
- [21] Fleszyński J., Lisowski M., Świerzyńska Z., *Odporność na prądy pełzające elastomerów silikonowych stosowanych na osłony w izolatorach kompozytowych* – Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, Materiały Konferencyjne NIWE 2000, Bielsko-Biała, czerwiec. 2000.
- [22] Fleszyński J., - *Łabolatorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce*, Praca zbiorowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [23] Fourmigue J.-M., Noel M., *Testing methods for performance prediction of outdoor insulation housing* - IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996, s. 451-454.
- [24] Fritz J., Owen M., *Hydrophobicity Recovery of Plasma-Treated Polydimethylsiloxane*, J.Adhesion, vol.54, 1995, s. 33-45.
- [25] Gielniak J., *Optymalizacja warunków pola elektrycznego wysokonapięciowego izolatora kompozytowego napięcia stałego z uwzględnieniem modyfikacji kształtu i doboru materiałów izolacyjnych*, Rozprawa doktorska, Poznań, wrzesień 2001.
- [26] Gorur R. S., et al., *A Laboratory Test for Tracking and Erosion resistance of HV Outdoor Insulation*, IEEE DEI, vol. 4, no. 6, 1997, s. 767-774.
- [27] Gorur R. S., Cherney E. A., Hackam R., Orbeck T., *The Electric Performance of Polymeric Insulating Materials under Accelerated Aging in a Fog Chamber*, IEEE Trans. PD, vol. 3, no. 3, 1988, s. 1157.
- [28] Gorur R. S., Cherney E. A., Hackam R., *A Comparative Study of Polymer Insulating Materials Under Salt-Fog Conditions*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, 1986, s. 175-182.
- [29] Gorur R. S., Chang J. W., Amburgey O. G., *Surface Hydrophobicity of Polymers Used for Outdoor Insulation*, IEEE/PES 1990 Winter Meeting 023-2 PWRD, Atlanta 1990.
- [30] Gorur R. S., Montesinor J. W., Varadadesikan L., Simmons S., Shah M., *A Rapid Test Method for Evaluating the Tracking and Erosion Resistance of Polymeric Outdoor Insulating Materials*, Annual Report, IEEE-CEIDP, Minneapolis, October 1997, s.402-405.
- [31] Gorur R. S., Karady G. G., Jagota A., Shah M., Yates M., *Aging in Silicone Rubber used for Outdoor Insulation*, IEEE Trans. PD, vol. 7, no. 2, 1992, s. 525.
- [32] Gregg S., Sing K. S. W., *Adsorption, surface area and porosity*, Academic Press Inc., NY (1982).
- [33] Gubański S.M., *Properties of Silicone Rubber Housing and Coatings*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 27, no. 2, 1992, s.374.
- [34] Gubański S., *New Focus in Japan on Fog Chamber Testing of Composite Insulators & Materials*, INMR, January/February 2002, s.34-44.
- [35] Gubański S.M., Wańkowicz J.G., *Distribution of Natural Pollution Surface layers on Silicone Rubber Insulators and their UV absorption*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 4, 1989, s.689.
- [36] Gubański S.M., Hartings R., *Swedish Research on the Application of Composite Insulators in Outdoor Insulation*, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 11, no. 5, September/October 1995, s.24-31.

- [37] Gustavsson T.G., *Outdoor Aging of Silicone Rubber Formulations in Coastal Environment*, Technical Rep. No. 353 L, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, May 2000.
- [38] Hackam R. – *Outdoor HV Composite Polymeric Insulators*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, no. 5, October 1999, s. 557- 585.
- [39] Hillborg H., Gedde U.W. - *Hydrophobicity Changes in Silicone Rubbers*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, no. 5, October 1999, s. 703- 717.
- [40] Houlgate R. G., Swift D. A., *Composite Rod Insulators for AC Power Lines: Electrical Performance of Various Designs at a Coastal Testing Station*, IEEE Trans. PD, vol. 5, 1990, s.1944-1955.
- [41] IEC 1109 - *Composite Insulators for AC Overhead Lines With a Nominal Voltage Greater than 1000 V – definitions, Test Methods and Acceptance Criterion*, 1992-03.
- [42] IEC587, *Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion resistance of electrical insulating materials used under severe ambient conditions*, 1986.
- [43] IEEE Std. 1133-1988– *IEEE Application Guide for Evaluating Non-Ceramic Materials for HV Outdoor Applications*, 1988
- [44] IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society in Outdoor Service Environment Committee S-32-3, *Round Robin Testing of RTV Silicone Rubber Coatings for Outdoor Insulators*, IEEE Trans. on PD., vol.11, s.1881-1887, 1996.
- [45] Issi M., Komatsubara M., *Hydrophobicity of Organic Insulating Materials*, IEEE – CEIDP 1996, s. 424-427.
- [46] Janssen H., Herden A., Kärner H. C., *The Loss and Recovery of Hydrophobicity on Silicone rubber Surfaces – ISH'97*, s. 145-148.
- [47] Kaltenborn U., Kindersberger J., Barsch R., Jahn H., *On the Electrical Performance of Different Insulating Materials in a Rotating-Wheel-Dip-Test - IEEE Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Minneapolis, October 19 - 22, 1997*, s. 398-401.
- [48] Kaltenborn U., Kindersberger J., Speck J., *Surface Behaviour of Epoxy Castings During the Early Aging period - IEEE Int. Conf. On Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics 1998*, s. 269-272.
- [49] Karady George G. – *Flashover Mechanism of Non-ceramic Insulators*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, no. 5, October 1999, s. 718-723.
- [50] Karady George G., Shah M., Brown R.L. –*Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators Used for outdoor Insulation – I.* IEEE Trans. on PD., vol.10, no. 4, October 1995, s. 1965- 1971.
- [51] Kim S. H., Cherney E.A., Hackam R., *The Loss and Recovery of Hydrophobicity of RTV Silicone Rubber Insulator Coatings*, IEEE on PWRD, vol. 5, no. 3, 1990, s. 1491.
- [52] Kim S.H., Cherney E. A., Hackam R. –*Hydrophobic Behaviour of Insulators Coated with RTV Silicon Rubber*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, June 1992, s. 610-622.
- [53] Kim S.H. , Cherney E. A., Hackam R., *Artificial Testing and Evaluation of RTV Coatings in Salt-Fog Chamber*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 26, 1991, s. 797-805.
- [54] Kim S. H., Cherney E.A., Hackam R., Rutherford K. G., *Chemical Changes at the Surface of RTV Silicone Rubber Coatings on Insulators During Dry Band Arcing*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, 1994, s. 106-123.
- [55] Kindersberger J. – informacja własna.

- [56] Leofanti G., Padovan M., Tozzola G., Venturelli B., *Surface area and pore texture of catalysts*, Catalysis Today 41 (1998) 201-219.
- [57] Looms J. S. T. – *Insulators for High Voltages*, Peter Peregrinus Ltd., London 1990.
- [58] *Materiały elektroizolacyjne* – praca zbiorowa, WNT, Warszawa 1965.
- [59] Maxwell A.J., Hartings R. – *Evaluation of Optimum Composite Insulator Design Using Service Experience and Test Station Data from Various Pollution Enviroments*, CIGRE 2000, 33-203; Paris 2000.
- [60] Mizuno Y., Naito K., Ishi K., Matsunoka R., Nakajima I., Kondo K., *Time Variation of Hydrophobicity and Weight of Silicone Rubber Immersed in Water*, 9th ISH, Graz 1995, 3050 –1.
- [61] Matsunoka R., Kondo K., Naito K., Ishii M., *Influence of Nonsoluble Contaminants on the Flashover Voltages of Artificially Contaminated Insulators*, IEEE Trans. PD, vol. 11, 1996, s. 420-425.
- [62] *P4 draft Standard Technique for HV Testing*, IEEE Power Engineering Society, Power Systems Instrumentation and Measurements Committee Draft Report, August 1994.
- [63] Pilling J., Berndt L., Bärsch R., - *Bewertung partieller Schichtleitfähigkeitsmessungen natürlich verschmutzter Isolatoren*, Elektrie Nr 11, 1982, s.518.
- [64] Peyergne G., Rahal A. M., Huraux C., *Flashover of liquid conducting film*, Part I: Flashover voltage, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 1, 1982.
- [65] PN-89/E-04442 - *Badanie odporności na prądy pełzające przy wysokim napięciu i pochylej próbce*.
- [66] PN – IEC 815 – *Wytyczne doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych*, 1998.
- [67] PN-IEC 507:1998 , *Badania sztucznie zabrudzonych izolatorów wysokonapięciowych stosowanych w sieciach prądu przemiennego* , marzec 1998.
- [68] Pokarier B., Lee C., Hawker D., *Leakage Current Monitoring of Composite Long Rod Insulators*, Proc. of 4th ICPADM, Brisbane, Australia, Paper No. 5119, July 1994, s. 530 - 533.
- [69] Pohl Z., *Izolacja wysokonapięciowa w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej*, Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej nr 10, Wrocław 1975.
- [70] Pohl Z., *Izolatory elektroenergetyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- [71] Pohl Z., Wańkowicz J., *Terenowa stacja badawcza napowietrznych izolatorów WN w warunkach dużych zabrudzeń*, Wiadomości Elektrotechniczne nr 10, 1982, s. 307.
- [72] Reynders J.P. ,Jandrell I.R. ,Reynders S.M., - *Review of Aging and Recovery of Silicone Rubber Insulation for Outodor Use* , IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 5, October 1999, s. 620-631.
- [73] Rizk F.A.M., *Mathematical models for pollution flashover* - Electra no. 78, 1981, s.71.
- [74] Shah M., Karady George G., Brown R.L., -*Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators Used for outdoor Insulation – II*, IEEE Trans. on PD., vol.10, no. 4, October 1995.
- [75] Schmuck F., Barsch R., Pilling J., *About an Improved Evaluation of Results by the Standardised Salt-Fog Procedure for Composite Insulators*, ETEP vol. 6, no. 4, s. 237-242, July/August 1996, s. 1972-1978.
- [76] Silverstein R.M., Bassler G.C., *Spektroskopowe metody identyfikacji związków organicznych*, PWN Warszawa 1970.

- [77] Sokolija K. i inni - *Consideration on the design of composite suspension insulators based on experience from natural ageing testing and electric field calculation*, CIGRE 2000, 33-204; Paris 2000.
- [78] Sorqvist T., Vlastos A. E., *Performance and Ageing of Polymeric Insulators*, IEEE Trans.PD, vol. 12, 1997, s.1657-1665.
- [79] Streitwieser A., Heathcock Jr. and C.H. -*Introduction to Organic Chemistry*, Macmillican Publishing Co., Inc., New York, 1976.
- [80] Streubel H., Reuter H., *Überschlagspannung ungleichmässig verschmutzter Isolatoren*. Materiały konferencyjne, 25 Intern. Wiss. Koll. Der TH Ilmenau, vol.3, 1980, s.353.
- [81] STRI Guide 92/1, *Hydrophobicity Classification Guide* – 1992
- [82] Subocz J., Matuszak R., *Przeskok zabrudzeniowy na izolatorze silikonowym*. Materiały Konferencyjne IW 2000, Poznań, maj. 2000.
- [83] Vlastos A.E., *Experience from insulators with RTV Silicone Rubber Sheds and Coatings*, IEEE Trans. on PWRD, vol. 5, no. 4, 1990, s.2030.
- [84] Vlastos A.E., Gubański S.M., *Surface Structural Changes of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators*, IEEE Trans. on PD, vol. 6, no. 2, 1991, s. 888-900.
- [85] Wańkowicz J., - *Przeskok zabrudzeniowy. Wybrane zagadnienia eksploatacyjne i materiałowo-konstrukcyjne izolatorów elektroenergetycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej - Wrocław 1995.
- [86] Wańkowicz J., *Zastosowanie modelu Obenausa do wyznaczania napięcia przeskoku izolatora z grupową nierównomiernością powłoki*, Archiwum Elektrotechniki, Tom XLIII, Zeszyt 1, 1994, s. 71-86.
- [87] Wańkowicz J., Bielecki J., Wieczorek K., *Elektroenergetyczny, hybrydowy izolator wiszący dla linii przesyłowej średniego napięcia*. Zgłoszenie patentowe nr P-345375.
- [88] Wańkowicz J., Bielecki J., *Koncepcja konstrukcji izolatora hybrydowego do sieci średniego napięcia* Mat. VI Ogólnopolskiej konferencji naukowo-technicznej, NIWE'2000, Bielsko-Biała czerwiec 2000.
- [89] Wańkowicz J., Bielecki J., *Elektroenergetyczny hybrydowy izolator liniowy – technologia i właściwości*, Mat. VIII Symp. EUI 01, Zakopane, październik 2001.
- [90] Wańkowicz J.G., Chrzan K., Pohl Z., *Influence of pollution layer thickness on flashover voltage of H.V. insulators*, Proc. of 7th Int. Symp. on HV Eng., Dresden, 1991, ref. Nr 43.01.
- [91] Wańkowicz J.G., Gubański S.M, Lompe W.D. - *Loss and Recovery of Hydrophobicity on RTV Coating Surfaces*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, no. 4, 1994, s.604.
- [92] Wańkowicz J., Pohl Z., Chrzan K., *Surface conductivity and ESDD as parameters of the pollution severity of high voltage insulators*, Archiwum Elektrotechniki, Tom XLIII, Zeszyt 1, 1994, s. 59-70.
- [93] Wańkowicz J., Pohl Z.- *Samoczyszczalność liniowych, długopniowych izolatorów ceramicznych wysokiego napięcia w warunkach eksploatacyjnych*, Archiwum Elektrotechniki, t.XL, z. 157/158 –3/4, 1991, s 679.
- [94] Wańkowicz J., Pohl Z., *Analysis of measurement procedure correlation of foreign layer conductivity over high voltage insulator surface*, Proc. of 4th Int. Symp. on HV Eng., Athens. 1983, ref. Nr 46.11.
- [95] Wańkowicz J. -*Zgadzania eksploatacyjne i badawcze izolatorów elektroenergetycznych (CIGRE 2000 S.C.-15, S.C.-22, S.C.-23)*, Biuletyn Nr 2/2000, Energoprojekt-Kraków S.A.
- [96] Wańkowicz J., Mbwana M., *Non-conservative approach to laboratory aging of silicones*. Archiwum Elektrotechniki, vol. 46 nr 4, 1997 s. 443-459,

- [97] Wieczorek K., *Wpływ długotrwałego oddziaływania wody na właściwości hydrofobowe gum silikonowych*, VI Ogólnopolska Konferencja Naukowa-Techniczna, Bielsko-Biała czerwiec 2000; Prace naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej Seria Konferencje nr 36/11, Wrocław 2000.
- [98] Wieczorek K., *Wyniki badań odporności elastomerów silikonowych na działanie prądów pełzających zmodyfikowanym testem pochylej próbki*. Materiały konferencyjne, VIII Sympozjum – Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia EUI' 2001, Zakopane, 18-20 października 2001.
- [99] Wieczorek K., *Badania przyspieszonego starzenia elastomerów silikonowych w komorze klimatycznej*. Materiały Konferencyjne IW 2000, Poznań, maj, 2000.
- [100] Wieczorek K., Gustavsson T., *Results of Investigation of Silicone Rubbers by Rotating Wheel Dip Test Method*. Przegląd Elektrotechniczny, Zeszyt specjalny, konferencja APTADM' 2001, Wrocław, wrzesień 2001.
- [101] Wieczorek K., Wańkowicz J., *Raport z badań materiału HTV – WACKER*
- [102] Wieczorek K., Wańkowicz J., *Influence of Corona Discharges in Presence of Water on Wettability of Silicone Rubbers*. Przegląd Elektrotechniczny, Zeszyt specjalny, konferencja APTADM' 2001, Wrocław, wrzesień 2001.
- [103] Woś A. – *Klimat Polski*, PWN 1999.
- [104] Xidong L., Shaowu W., Ju F., Zhicheng G., *Development of Composite Insulators in China*, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, no. 5, October 1999, s. 586- 594.
- [105] Yoshimura N., Kumagai S., Nishimura S., *Electrical and Environmental Aging of Silicone Rubber Used in Outdoor Insulation* - IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, no. 5, October 1999, s. 632- 650.
- [106] Zhaoying Sun, Zhiyi Su, *Pollution Flashover & Selection of Insulators for Transmission Lines in China*, INMR, November/December 2001, s.27-34.

