

Instytut Elektroenergetyki
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Poznańska



Autoreferat rozprawy doktorskiej pt.:

**Zjawisko bąbelkowania
w nowoczesnych układach izolacyjnych
transformatorów energetycznych**

mgr inż. Kamil Lewandowski

Promotor:
dr hab. inż. Hubert Morańda, prof. uczelni

Poznań, 04.04.2023

Spis treści

1. Uzasadnienie wyboru tematu rozprawy	3
2. Struktura pracy	4
3. Cel, teza i zakres pracy	5
4. Badania eksperymentalne.....	7
4.1 Obiekty badań, stanowisko badawcze i procedura pomiarowa	7
4.2 Wyznaczenie przenikalności elektrycznej badanych materiałów stałych.....	10
4.3 Wyniki badań	11
4.4 Porównanie badanych materiałów stałych w aspekcie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania	13
4.5 Porównanie badanych materiałów ciekłych w aspekcie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania	17
4.6 Wyznaczenie równań matematycznych opisujących temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania	18
4.7 Wyniki badań a zalecenia normy IEC 60076-14	19
5. Istotny wkład naukowy rozprawy	22
6. Podsumowanie	23
7. Dorobek naukowy autora	25
Literatura	26

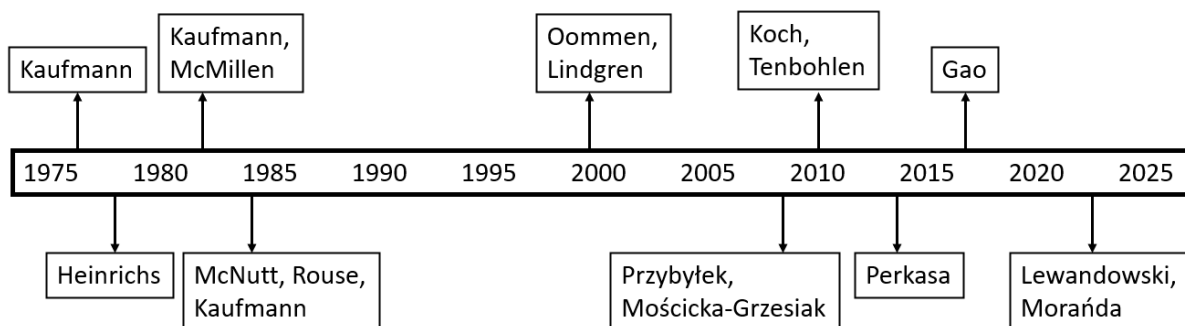
1. Uzasadnienie wyboru tematu rozprawy

Najpopularniejszą cieczą elektroizacyjną stosowaną w transformatorach jest olej mineralny produkowany na bazie ropy naftowej [1]. W ostatnich latach można jednak zaobserwować rosnące zainteresowanie alternatywnymi cieczami, np. estrem syntetycznym Midel 7131, który, w odróżnieniu od oleju mineralnego, jest bardzo dobrze biodegradowalny.

Izolacja stała na bazie celulozy produkowana jest już od ponad 100 lat, ale rozwój materiałoznawstwa pozwolił na opracowanie nowych materiałów o zwiększonej odporności termicznej, tzw. materiałów wysokotemperaturowych. Wśród nich wyróżnić można: Nomex[®] 926 i Nomex[®] 910.

Nomex[®] 926 jest czystym aramidem [2], natomiast Nomex[®] 910 jest zbudowany z jednej warstwy wysokiej jakości ulepszonej cieplnie celulozy oraz dwóch warstw zewnętrznych z odpornych na wysoką temperaturę włókien polimeru meta-aramidowego [3, 4].

Jedną z przyczyn awarii transformatorów jest zjawisko bąbelkowania (ang. *bubble effect, b.e.*), które można definiować jako gwałtowne uwalnianie pary wodnej z ich izolacji stałej po przekroczeniu krytycznej temperatury, zwanej temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania [5]. Do jego podstawowych skutków można zaliczyć pogorszenie parametrów elektroizacyjnych układu izolacyjnego oraz zwiększenie ciśnienia wewnątrz kadzi [6, 7]. Zjawisko to zostało stosunkowo dobrze zbadane w konwencjonalnej izolacji celulozowo-olejowej [7, 8, 9, 10] (rys. 1.1), jednak w literaturze brak jest wzmianek o wynikach badań w materiałach Nomex[®] 910 oraz Nomex[®] 926. Lukę tę wypełnia niniejsza rozprawa doktorska.



Rys. 1.1. Oś czasu przedstawiająca rok publikacji przez wybranych autorów wyników ich badań dotyczących zjawiska bąbelkowania [na podstawie 11]

2. Struktura pracy

W rozdziale 2.1 rozprawy doktorskiej przedstawiono układ izolacyjny transformatorów energetycznych.

Rozdział 2.2 dotyczy problematyki zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych. Przedstawia on statystykę zawilgocenia izolacji stałej transformatorów w Polsce i na świecie, przyczyny występowania wody w tej izolacji, wpływ nadmiernego zawilgocenia izolacji na pracę transformatora, formy występowania wody w celulozie oraz metody wyznaczania zawilgocenia izolacji stałej.

W rozdziale 2.3 przedstawiono zjawisko bąbelkowania w układach izolacyjnych transformatorów. Opisano wpływ różnych czynników na jego temperaturę inicjacji oraz dopuszczalne wartości temperatury układu izolacyjnego w aspekcie ryzyka inicjacji *b.e.* Scharakteryzowano również rolę wiązań fizycznych w materiałach izolacyjnych w rozwoju zjawiska bąbelkowania oraz przedstawiono modele matematyczne pozwalające wyznaczyć temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania w najpopularniejszym układzie izolacyjnym, czyli układzie celulozowo-olejowym.

Rozdział 3 przedstawia cel pracy, tezę główną wraz z podtezami oraz zakres pracy.

W rozdziale 4 opisano wykonane badania eksperymentalne z uwzględnieniem sposobu przygotowania próbek i opisu stanowiska badawczego. Przedstawiono również wyniki pomiarów oraz dokonano ich obszernego porównania dla wszystkich zbadanych materiałów elektroizolacyjnych.

Rozdział 5 stanowi podsumowanie wykonanych badań oraz przedstawia wyciągnięte z nich wnioski.

3. Cel, teza i zakres pracy

Celem pracy jest zbadanie zjawiska bąbelkowania w nowoczesnych materiałach stosowanych w układach izolacyjnych transformatorów energetycznych.

Głównym obiektem badań jest materiał stanowiący połączenie celulozy oraz aramid. Materiał ten jest produktem firmy DuPont i znany jest pod nazwą Nomex[®] 910. Został on stworzony na potrzeby przemysłu transformatorowego. Ma dopuszczalną temperaturę pracy nieznacznie niższą od papieru z samego aramid, ale jest od niego dużo tańszy, co przesądza o jego dużej aplikacyjności.

W pracy sformułowano tezę główną oraz trzy podtezy. W badaniach założono, że miarą polarności materiału jest jego przenikalność elektryczna.

Teza główna: *Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w złożonych układach izolacyjnych zależy w istotny sposób od polarności komponentów tworzących układ izolacyjny.*

Podteza 1. *Zastąpienie celulozy aramidem, który jest materiałem o mniejszej polarności, powinno powodować obniżenie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania.*

Aramid wykazuje mniejszą polarność niż celuloza, czego skutkiem jest mniejsza energia wiązań fizycznych aramid-woda i, w konsekwencji, wymagana jest mniejsza energia do desorpcji wody z jego powierzchni. Przekłada się to na niższą temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania w układach izolacyjnych aramid-olej, niż w układach celuloza-olej.

Podteza 2. *W układzie izolacyjnym aramid-dielektryk ciekły zastąpienie oleju mineralnego estrem syntetycznym powinno powodować wzrost temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania.*

Na włóknach aramidowych zawilgoconej izolacji znajduje się kilka warstw adsorbowanej wody w postaci cząsteczkowej, a na nich z kolei znajduje się kilka warstw oleju mineralnego albo estru. Uwolnienie wody z powierzchni włókien aramidowych wymaga rozerwania warstw oleju albo estru oraz warstw wody. Energia wiązań estru (o $\epsilon_w=3,6$) współpracującego z zawilgoconym aramidem jest większa, niż energia wiązań oleju mineralnego (o $\epsilon_w=2,2$). To sprawia, że uwolnienie wody z aramid pokrytego warstwami estru będzie wymagało większej energii, niż uwolnienie wody z aramid pokrytego warstwami oleju mineralnego. To powinno przełożyć się na wyższą temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania w układzie aramid-ester syntetyczny, niż w układzie aramid-olej mineralny.

Podteza 3. *Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach stanowiących kompozycję włókien aramidowych i celulozowych powinna być wyższa niż w materiałach zawierających tylko włókna celulozowe albo aramidowe.*

W układzie składającym się z kompozytu aramidu i celulozy oraz cieczy elektroizolacyjnej, po przekroczeniu temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiale o niższej temperaturze inicjacji (aramid), uwalnianie wody z włókien aramidowych powoduje lokalne obniżenie temperatury kompozytu, a więc także stykających się z nimi włókien celulozy (uwolnienie wody z izolacji wymaga dostarczenia jej energii, przez co zjawisko to ma charakter endotermiczny). Celuloza o obniżonej temperaturze może, do pewnego stopnia, wchłonąć wodę desorbowaną z aramidu bez inicjowania w niej zjawiska bąbelkowania. Dopiero dalsze podniesienie temperatury kompozytu spowoduje, poza zintensyfikowaniem procesu uwalniania wody z włókien aramidowych, inicjację zjawiska bąbelkowania w celulozie. W rezultacie powinno się zaobserwować podwyższenie temperatury inicjacji *b.e.* w kompozycie w stosunku do temperatury inicjacji tego zjawiska w samym aramidzie.

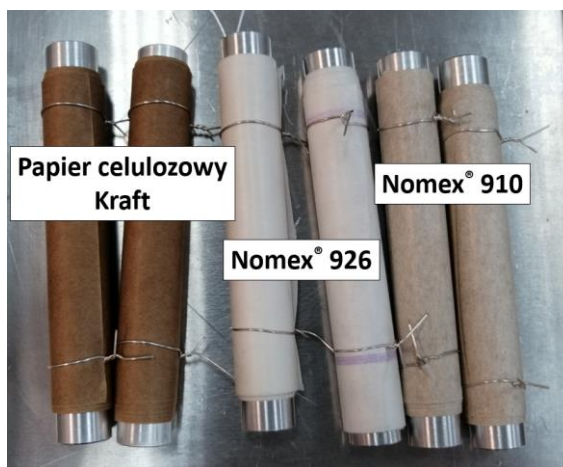
Zakres pracy obejmuje badania porównawcze temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach: Nomex[®] 910 (kompozyt celulozy i aramidu), celuloza typu Kraft i Nomex[®] 926 (aramid) w układzie z olejem mineralnym Orlen Trafo eN oraz z estrem syntetycznym Midel 7131. W pracy uwzględniono różny stopień zawilgacania się badanych rodzajów izolacji stałej przygotowywanych do badań w tych samych warunkach klimatycznych otoczenia (powietrza).

4. Badania eksperymentalne

4.1 Obiekty badań, stanowisko badawcze i procedura pomiarowa

Przeprowadzone badania polegały na pomiarze temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w układach złożonych z różnych materiałów izolacyjnych stałych i ciekłych stosowanych jako izolacja transformatorów energetycznych. Głównym celem badań było przeprowadzenie analizy porównawczej temperatury inicjacji *b.e.* w nowoczesnej izolacji wysokotemperaturowej Nomex® 910, stanowiącej kompozyt celulozy i aramidu, z temperaturą inicjacji tego zjawiska w materiałach składających się na ten kompozyt.

Próbki badanych materiałów stałych zostały nawinięte na aluminiowe patrony o długości 120 mm, średnicy wewnętrznej 8 mm oraz zewnętrznej 16 mm i zabezpieczone przed rozwinięciem (rys. 4.1). W ścianie każdego patronu, wzdłuż jego osi, wykonano otwór o średnicy 1 mm i głębokości 60 mm (połowa jego długości). W otwór ten wprowadzano termoparę do pomiaru temperatury patronu, która podczas badań była traktowana jako temperatura izolacji w chwili inicjacji zjawiska bąbelkowania.

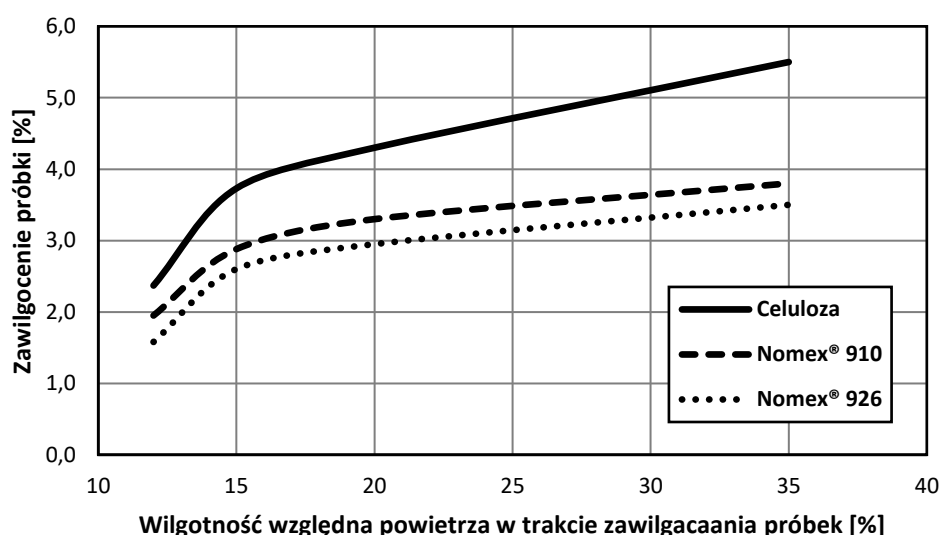


Rys. 4.1. Fotografia badanych materiałów izolacyjnych stałych po ich nawinięciu na patrony i zabezpieczeniu przed rozwinięciem [materiały własne]

Ze względu na fakt, że temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania jest silnie zależna od zawilgocenia materiału, niezwykle ważne było przygotowanie jego próbek o precyzyjnie wyznaczonym zawilgoceniu. W tym celu próbki każdorazowo były poddane procesowi suszenia próżniowego w temperaturze 105°C i pod ciśnieniem $4 \cdot 10^{-1}$ mbara. Następnie, próbki były ważone z dokładnością do 0,0001 g i poddane procesowi kontrolowanego zawilgacania w komorze klimatycznej – aż do osiągnięcia przez nieżądanego zawilgocenia. Warunki klimatyczne w komorze były ustalane na podstawie dostępnych w literaturze

krzywych równowagi zawilgocenia danego materiału w zależności od zawilgoceniem powietrza, w którym się znajduje. Osiągnięcie przez próbkiżądanego zawilgocenia zajmowało 4-6 dni. Próbki trzech różnych materiałów stałych zawilgacano razem, co zapewniało ich identyczne zawilgocenie względne.

Materiały zbudowane z włókien aramidowych adsorbują mniej wody niż materiały celulozowe, co jest związane z ich niższą polarnością. W celu zweryfikowania tego stwierdzenia wybrano część próbek zawilgaczanych w tej samej temperaturze (40°C), gdy jedyną zmienną wpływającą na ich zawilgocenie była różna wilgotność powietrza w komorze klimatycznej. Porównanie średniej wartości zawilgocenia próbek wykazało, że w temperaturze 40°C Nomex® 910 zawilgaca się o ok. 28% mniej, a Nomex® 926 o ok. 32% mniej niż papier celulozowy typu Kraft (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Charakterystyki zawilgocenia badanych materiałów w zależności od wilgotności względnej powietrza w komorze klimatycznej podczas kondycjonowania próbek w temperaturze 40°C [materiały własne]

Do pomiarów temperatury inicjacji *b.e.* jedną połowę zawilgoconych próbek materiałów stałych zanurzono w oleju mineralnym Orlen Trafo eN, a drugą w estrze syntetycznym Midel 7131. Próbki impregnowano w uszczelnionych naczyniach, w temperaturze pokojowej, przez ok. 48 godzin, po czym w temperaturze 20°C i pod ciśnieniem ok. 1 mbar prowadzono ich odgazowywanie, a proces ten był przerywany w chwili ustania generowania pęcherzyków gazowych z próbek. Impregnowanie cieczą i odgazowywanie próbek w temperaturze otoczenia powoduje, że tempo migracji wody

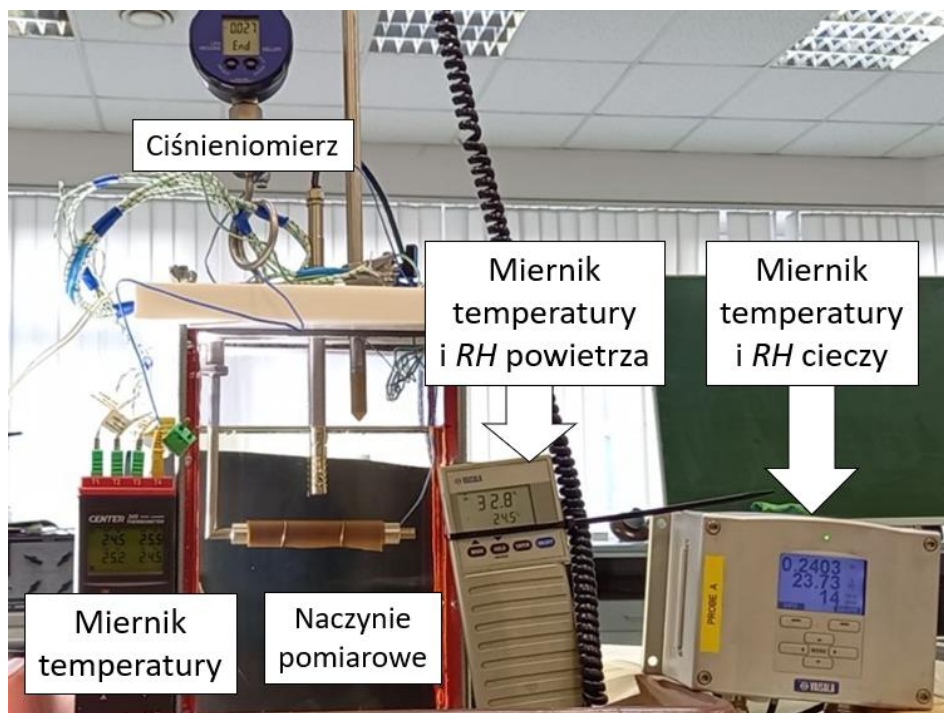
między izolacją stałą i ciekłą jest bardzo wolne, przez co zmianę zawilgocenia izolacji stałej w czasie jej impregnowania i odgazowywania można było pominąć.

W tabelicy 4.1 przedstawiono zestawienie wartości zawilgocenia wszystkich próbek przygotowanych do badań.

Tab. 4.1 Zawilgocenie próbek materiałów stałych użytych w eksperymencie

Zawilgocenie papieru celulozowego zanurzonego w oleju mineralnym [%]	Zawilgocenie papieru celulozowego zanurzonego w Midel 7131 [%]	Zawilgocenie Nomex® 910 zanurzonego w oleju mineralnym [%]	Zawilgocenie Nomex® 910 zanurzonego w Midel 7131 [%]	Zawilgocenie Nomex® 926 zanurzonego w oleju mineralnym [%]	Zawilgocenie Nomex® 926 zanurzonego w Midel 7131 [%]
0,66	0,65	0,56	0,56	0,50	0,50
1,85	1,85	1,21	1,25	0,95	0,95
1,85	1,85	1,95	2,04	1,03	1,17
2,37	2,38	2,05	2,70	1,56	1,66
2,80	2,70	2,71	2,88	1,58	1,66
3,66	3,73	2,90	3,30	1,97	1,95
3,78	3,74	3,30	3,80	2,50	2,56
4,30	4,30	3,30	4,90	2,58	2,60
4,30	5,50	3,80	-	2,95	2,95
5,50	5,50	3,80	-	2,95	3,50
5,50	6,14	4,87	-	3,50	3,50
6,17	-	-	-	3,50	3,84
-	-	-	-	4,04	-

W celu przeprowadzenia pomiarów temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania przygotowano stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 4.3. Badania rozpoczynały się po umieszczeniu patronu z próbką badanego materiału stałego w naczyniu pomiarowym napełnionym badaną cieczą i odczekaniu ok. 10 minut. Tempo podnoszenia temperatury patronu było za każdym razem takie samo i wynosiło ok. 1°C/s na początku eksperymentu, a blisko spodziewanej temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania tempo to zmniejszono do ok. 0,1°C/s. Umożliwiło to dokładne wyznaczenie temperatury inicjacji tego zjawiska.



Rys. 4.3. Fotografia stanowiska pomiarowego podczas badań [materiały własne]

4.2 Wyznaczenie przenikalności elektrycznej badanych materiałów stałych

W pracy założono, że miarą polarności materiału jest jego przenikalność elektryczna. W celu wyznaczenia przenikalności elektrycznej materiałów stałych posłużono się metodą techniczną, polegającą na pomiarze pojemności elektrycznej danego materiału i odniesieniu jej do obliczonej pojemności elektrycznej powietrza w takim samym układzie elektrod.

W tabelicy 4.2 przedstawiono wartości względnej przenikalności elektrycznej badanych próbek wyznaczone dla napięcia o częstotliwości 50 Hz. Niezależnie od tego czy badane materiały były zaimpregnowane czy niezaimpregnowane cieczą elektroizolacyjną, celuloza charakteryzuje się najwyższą przenikalnością elektryczną. Znacząco mniejszą wartością charakteryzuje się Nomex[®] 926, którego przenikalność elektryczna stanowi 51% (w oleju mineralnym) albo 55% (w estrze syntetycznym) przenikalności celulozy. Natomiast Nomex[®] 910 charakteryzuje się przenikalnością elektryczną względną równą, odpowiednio, 77% i 87% przenikalności celulozy. Wyniki te plasują się pomiędzy wartościami dla celulozy i materiału czysto aramidowego, co wynika z faktu, że materiał ten stanowi kompozyt obu składników.

Materiały zaimpregnowane cieczą elektroizolacyjną charakteryzują się wyższą przenikalnością elektryczną niż te same materiały niezaimpregnowane. Wynika to z tego, że użyte ciecze elektroizolacyjne posiadają większą przenikalność elektryczną niż powietrze. Ponadto, zaimpregnowanie materiału stałego estrem syntetycznym powoduje większy wzrost

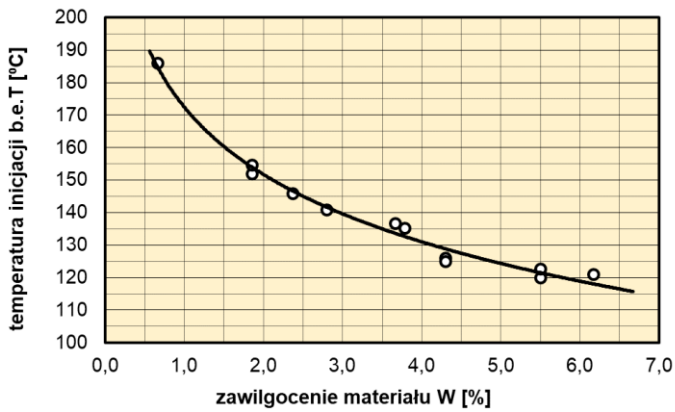
przenikalności elektrycznej takiego układu, niż w przypadku zaimpregnowania go olejem mineralnym, co wynika z większej przenikalności elektrycznej estru ($\epsilon_w = 3,2$) od oleju mineralnego ($\epsilon_w = 2,2$).

Tab. 4.2 Wyznaczone wartości względnej przenikalności elektrycznej ϵ_w dla częstotliwości 50 Hz

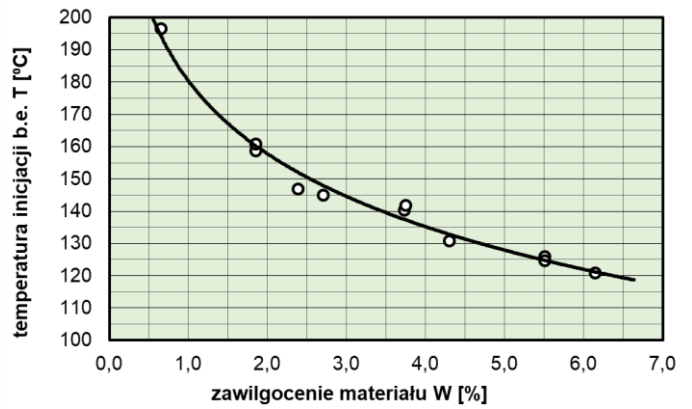
Badany materiał	C_X [pF]	C_0 [pF]	ϵ_w [-]	$\epsilon_{w\text{materiału}}$ w odniesieniu do $\epsilon_{w\text{celulozy}}$ [%]
Celuloza typu Kraft	378	138,21	2,74	100
Nomex [®] 910	289	119,57	2,42	88
Nomex [®] 926	266	190,04	1,40	51
Celuloza typu Kraft zaimpregnowana olejem mineralnym	599	138,21	4,33	100
Nomex [®] 910 zaimpregnowany olejem mineralnym	400	119,57	3,35	77
Nomex [®] 926 zaimpregnowany olejem mineralnym	418	190,04	2,20	51
Celuloza typu Kraft zaimpregnowana estrem syntetycznym	683	138,21	4,94	100
Nomex [®] 910 zaimpregnowany estrem syntetycznym	513	119,57	4,29	87
Nomex [®] 926 zaimpregnowany estrem syntetycznym	518	190,04	2,73	55

4.3 Wyniki badań

Wyniki badań zostały przedstawione w formie charakterystyk zależności temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania badanego materiału stałego zanurzonego w danej cieczy od jego zawilgocenia. Na wykresach z rysunków 4.4 - 4.6 zaznaczono punkty pomiarowe oraz wykreślono dopasowane do nich krzywe, uzyskane przy zastosowaniu regresji nieliniowej. Punktem pomiarowym najlepiej odpowiada krzywa logarymiczna. Barwa tła wykresów jest powiązana z rodzajem cieczy, w której zanurzone były badane próbki materiałów stałych: żółta odpowiada olejowi mineralnemu Orlen Trafo eN, natomiast zielona estrowi syntetycznemu Midel 7131. Rodzaj linii jest powiązany z rodzajem badanego materiału stałego: ciągła dotyczy papieru celulozowy typu Kraft, przerywana dotyczy papieru celulozowego wzmocnionego aramidem (Nomex[®] 910), a kropkowana dotyczy papieru aramidowego (Nomex[®] 926).

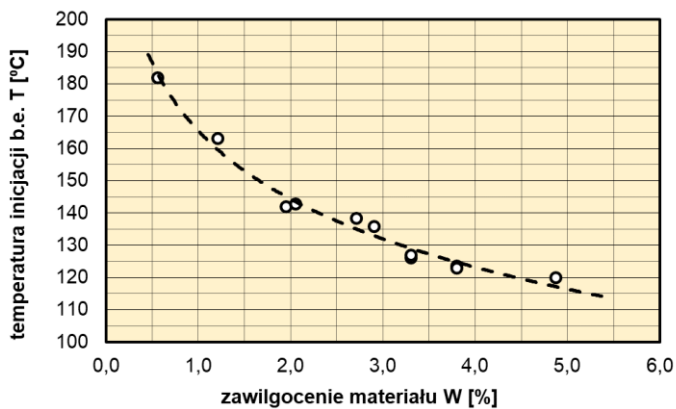


a)

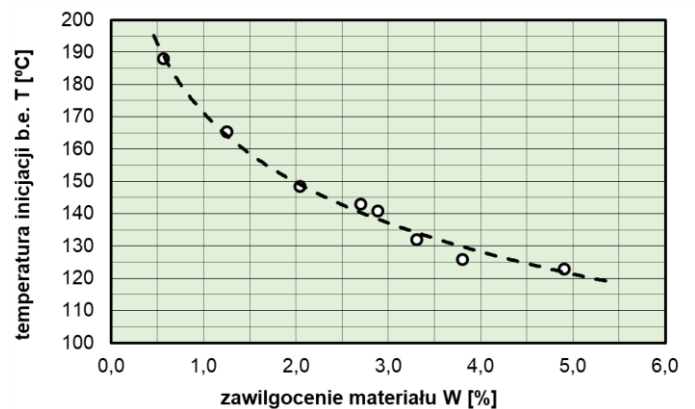


b)

Rys. 4.4. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w zależności od zawilgocenia papieru celulozowego typu Kraft zanurzonego w: a) oleju mineralnym Orlen Trafo eN, b) estrze syntetycznym Midel 7131

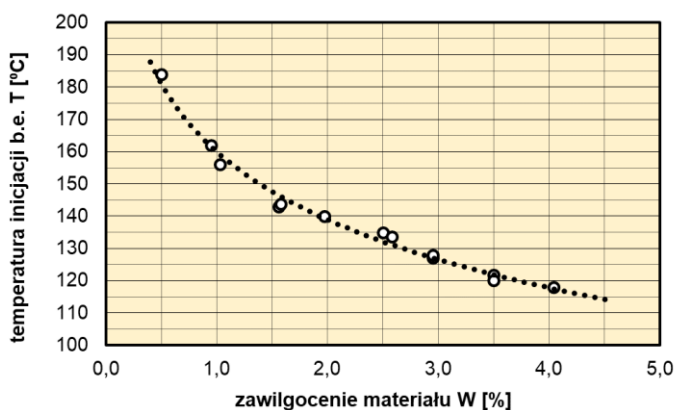


a)

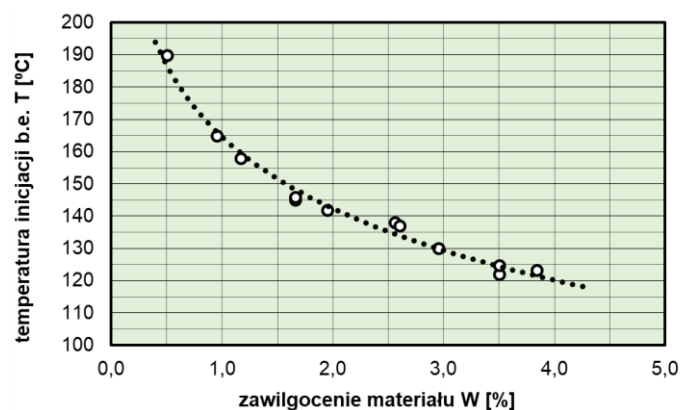


b)

Rys. 4.5. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w zależności od zawilgocenia papieru celulozowego wzmocnionego aramidem (Nomex[®] 910) zanurzonego w: a) oleju mineralnym Orlen Trafo eN, b) estrze syntetycznym Midel 7131



a)

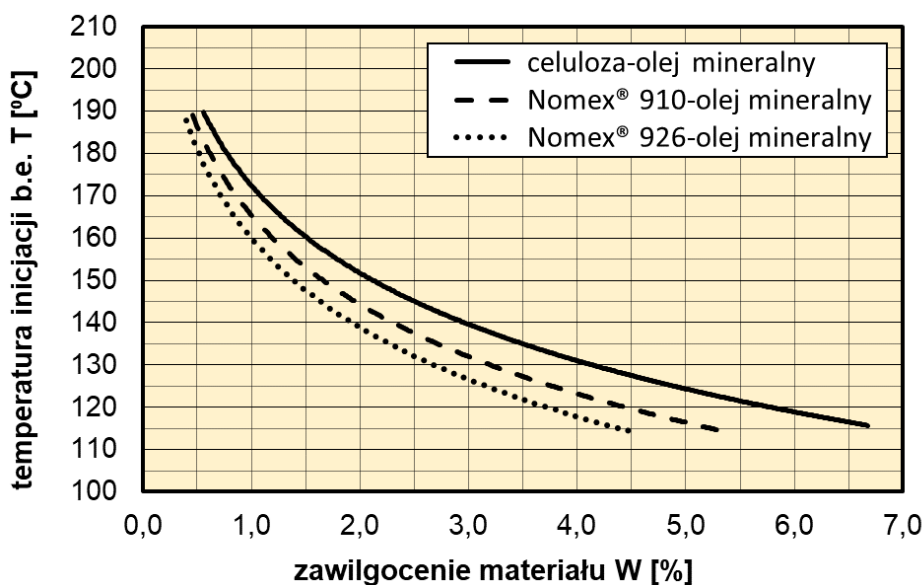


b)

Rys. 4.6. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w zależności od zawilgocenia papieru aramidowego Nomex[®] 926 zanurzonego w: a) oleju mineralnym Orlen Trafo eN, b) estrze syntetycznym Midel 7131

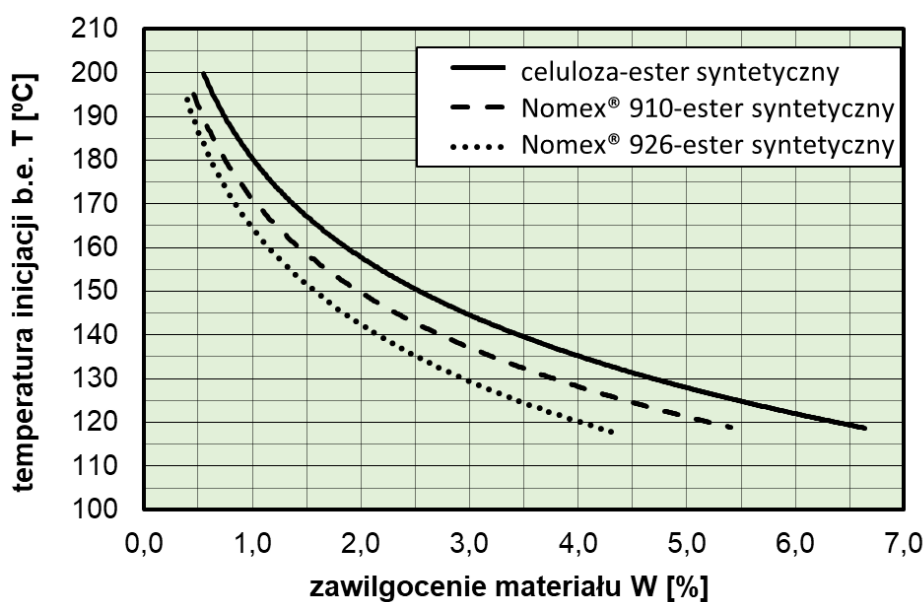
4.4 Porównanie badanych materiałów stałych w aspekcie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania

Na rysunku 4.7 porównano temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania zbadanych próbek stałych zanurzonych w oleju mineralnym. Z analizy porównawczej wynika, że papier celulozowy typu Kraft charakteryzuje się najwyższą temperaturą inicjacji *bubble effect*, natomiast najniższą ma papier aramidowy Nomex[®] 926. Próbką materiału Nomex[®] 910 plasuje się pomiędzy wspomnianymi wyżej materiałami.



Rys. 4.7. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania papieru celulozowego typu Kraft, Nomex[®] 910 oraz Nomex[®] 926 zaimpregnowanych olejem mineralnym Orlen Trafo eN w zależności od ich zawilgocenia

Rysunek 4.8 przedstawia takie samo porównanie, ale dla próbek zanurzonych w estrze syntetycznym. Analizując przebiegi, podobnie jak w przypadku oleju mineralnego, można zauważyć, że najniższą temperaturą inicjacji *b.e.* charakteryzuje się Nomex[®] 926, a najwyższą celuloza. Nomex[®] 910 plasuje się pomiędzy wspomnianymi materiałami.

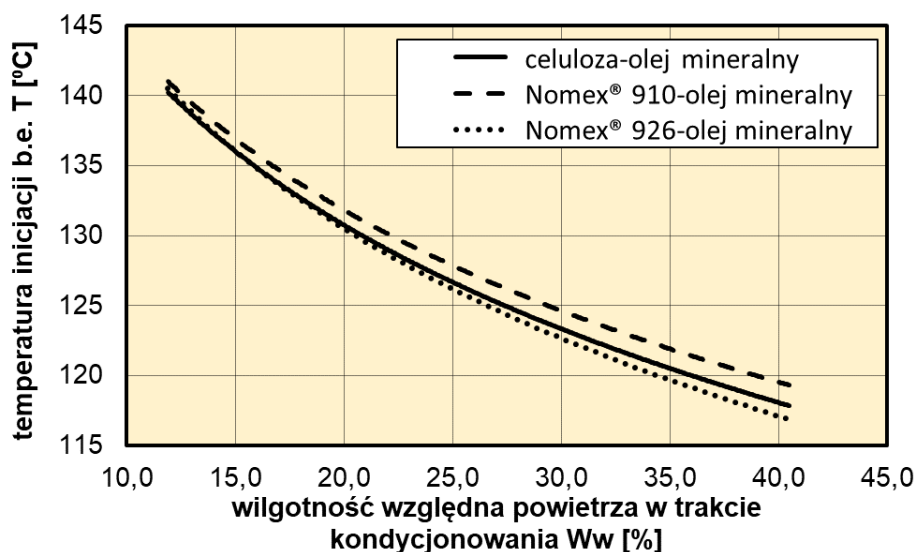


Rys. 4.8. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania papieru celulozowego Kraft, Nomex® 910 oraz Nomex® 926 zaimpregnowanych estrem syntetycznym Midel 7131 w zależności od ich zawilgocenia

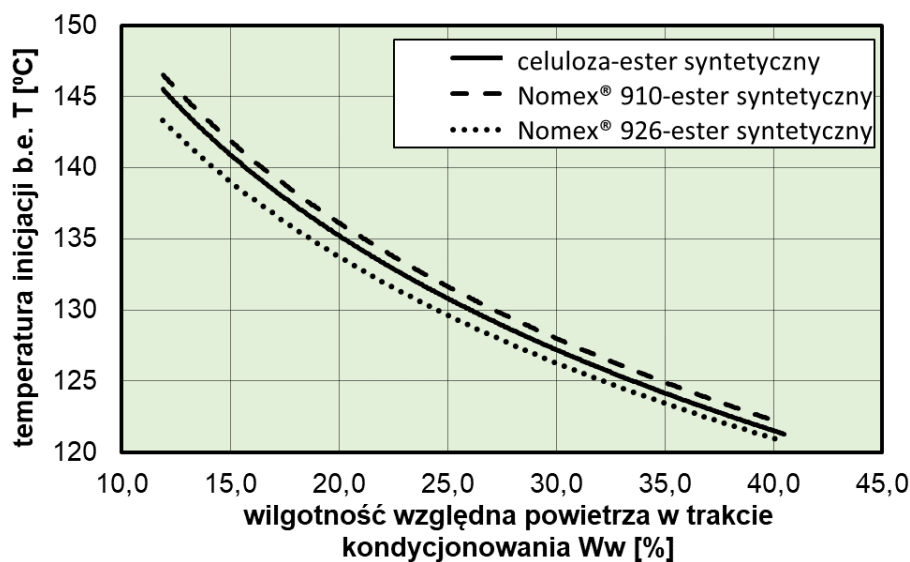
Ważną kwestią w aspekcie zagrożenia wynikającego z możliwości wystąpienia zjawiska bąbelkowania w różnych materiałach stałych jest ich zdolność do adsorpcji wody. Jak wynika z rysunku 4.2, w tych samych warunkach klimatycznych materiały izolacyjne zawierające włókna aramidowe osiągają niższe zawilgocenie niż materiały zbudowane tylko z włókien celulozy. W związku z tym, porównania tych materiałów w aspekcie temperatury inicjacji *b.e.* dokonano na podstawie badań na wybranych próbkach materiałów, które były zawilgacane w tej samej temperaturze 40°C (przy różnej wilgotności względnej powietrza). Rezultaty tych badań przedstawiają rysunki 4.9 i 4.10. Można na nich zauważyć, że materiał będący kompozytem celulozy oraz aramidu, czyli Nomex® 910, charakteryzuje się nieznacznie wyższą temperaturą inicjacji *b.e.* niż pozostałe materiały w obu badanych cieczach elektroizolacyjnych. Fakt ten można powiązać z bliską współobecnością w tym materiale włókien aramidowych oraz celulozowych.

Po przekroczeniu temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania, woda jest najpierw uwalniana z włókien aramidowych, co wynika z ich niższej polarności w porównaniu do celulozy. W miejscu przekroczenia temperatury inicjacji *b.e.* następuje lokalne obniżenie temperatury kompozytu (uwalnianie wody jest zjawiskiem endotermicznym), a więc także celulozy, dzięki czemu celuloza o obniżonej temperaturze może, do pewnego stopnia, wchłonąć wodę desorbowaną z aramidu bez inicjowania w niej zjawiska bąbelkowania. Dopiero dalsze podniesienie temperatury kompozytu spowoduje zintensyfikowanie procesu uwalniania wody z włókien aramidowych oraz inicjację zjawiska bąbelkowania w celulozie.

Skutkiem tego jest wyższa temperatura inicjacji *b.e.* w kompozycie w stosunku do temperatury inicjacji tego zjawiska w samym aramidzie.

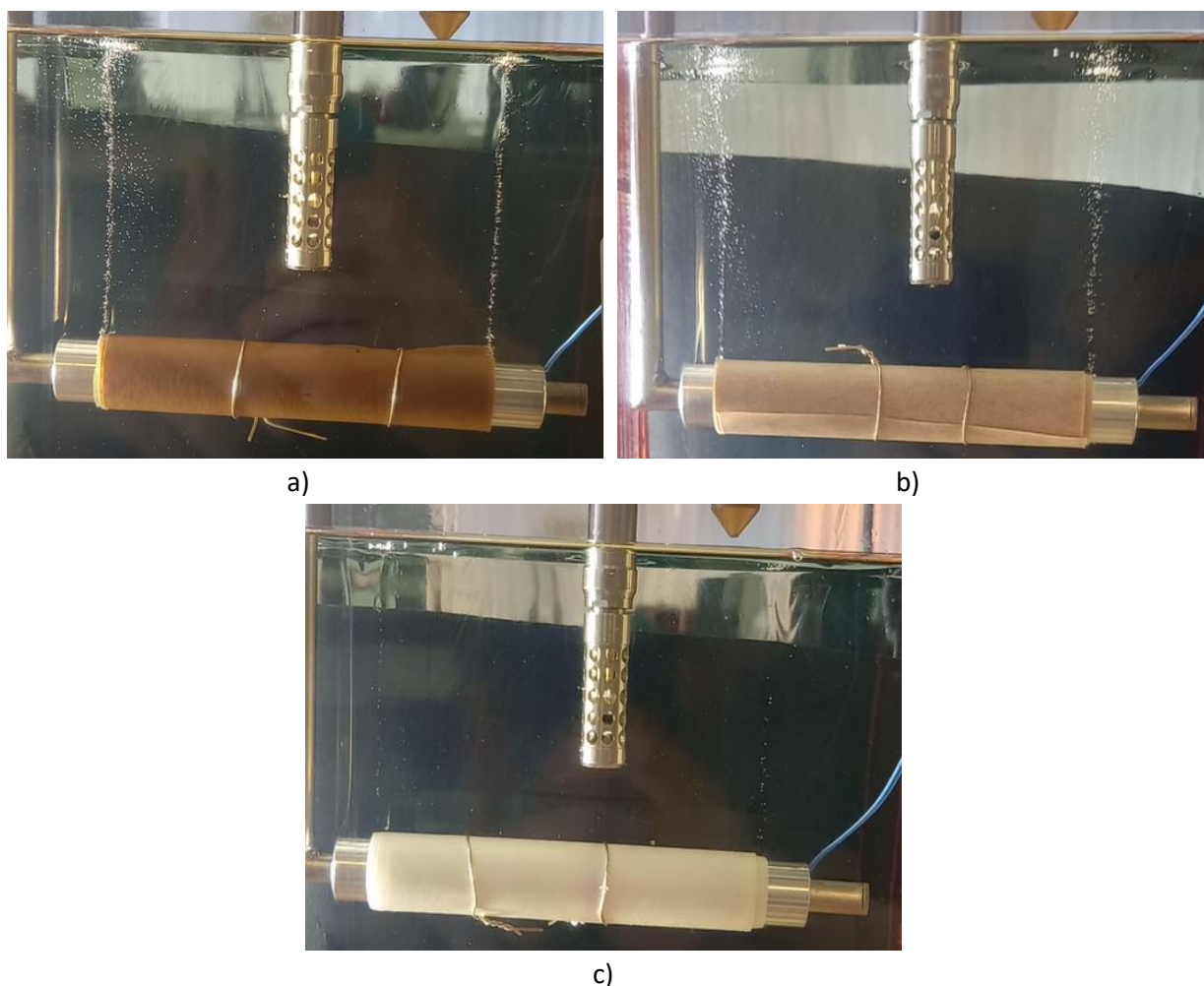


Rys. 4.9. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w papierze celulozowym Kraft, Nomex® 910 oraz Nomex® 926 zaimpregnowanych olejem mineralnym Orlen Trafo eN w zależności od wilgotności względnej powietrza w trakcie kondycjonowania próbek tych materiałów w komorze klimatycznej w temperaturze 40°C



Rys. 4.10. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania papieru celulozowego Kraft, Nomex® 910 oraz Nomex® 926 zaimpregnowanych estrem syntetycznym Midel 7131 w zależności od wilgotności względnej powietrza w trakcie kondycjonowania próbek tych materiałów w komorze klimatycznej w temperaturze 40°C

Na rysunku 4.11 przedstawiono porównanie intensywności zjawiska bąbelkowania w próbkach badanych materiałów izolacyjnych zanurzonych w oleju mineralnym. Intensywność *b.e.* należy tu rozumieć jako liczbę i wielkość generowanych pęcherzyków pary wodnej w jednostce czasu. Podczas badań stwierdzono, że intensywność zjawiska bąbelkowania jest najmniejsza w papierze czysto aramidowym Nomex[®] 926, natomiast w papierze celulozowym Kraft oraz materiale Nomex[®] 910 intensywność bąbelkowania jest podobna, co można tłumaczyć tym, że wewnętrzna warstwa materiału Nomex[®] 910 jest również zbudowana z celulozy, której sumarycznie musi być zdecydowanie więcej niż aramidu (proporcja obu składników w kompozycie jest tajemnicą handlową jego producenta). Podobne wyniki zaobserwowano w układach z estrem syntetycznym.



Rys. 4.11. Fotografie przedstawiające zjawisko bąbelkowania 5 s po jego inicjacji w próbkach badanych materiałów kondycjonowanych w takich samych warunkach klimatycznych (temperatura 40°C, wilgotność względna powietrza 12%), zanurzonych w oleju mineralnym: a) papier celulozowy typu Kraft, b) Nomex[®] 910, c) Nomex[®] 926

Przeprowadzone badania potwierdziły postawioną przez autora hipotezę 1, brzmiącą: „Zastąpienie celulozy aramidem, który jest materiałem o mniejszej polarności, powinno powodować obniżenie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania”. Ponadto, Nomex[®] 910, będący kompozytem celulozy oraz aramidu, charakteryzuje się wyższą wartością temperatury inicjacji *bubble effect* niż jego materiały składowe.

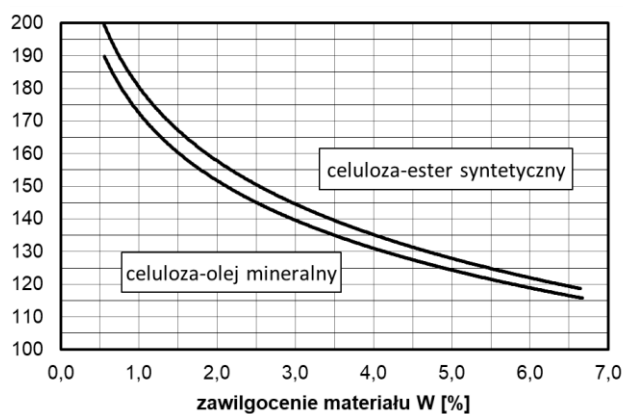
Analiza wyników badań potwierdziła również postawioną hipotezę 3 („Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach stanowiących kompozycję włókien aramidowych i celulozowych powinna być wyższa niż w materiałach zawierających tylko włókna celulozowe albo aramidowe”). Zjawisko to można wytłumaczyć na podstawie różnej polarności materiałów celulozowych i aramidowych, co w konsekwencji prowadzi do początkowego wchłaniania przez włókna celulozowe wody desorbowanej z włókien aramidowych, przez co następuje podwyższenie temperatury inicjacji *bubble effect*.

4.5 Porównanie badanych materiałów ciekłych w aspekcie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania

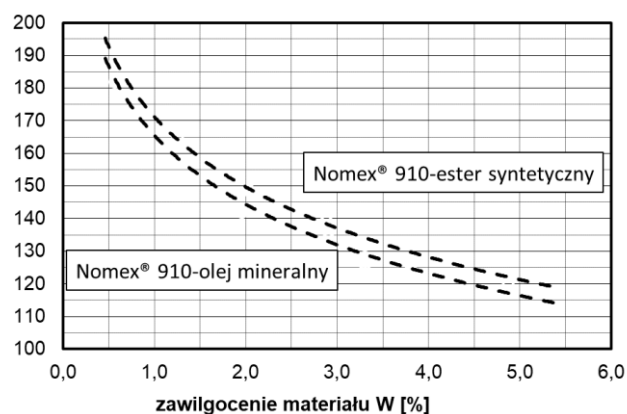
Na rysunku 4.12 przedstawiono zależność temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania od zawilgocenia próbek badanych materiałów zanurzonych w dwóch różnych cieczach elektroizolacyjnych. Można zauważyć, że temperatura inicjacji *b.e.* w materiałach stałych jest zawsze wyższa w przypadku zanurzenia ich w estrze syntetycznym.

Średnia różnica pomiędzy temperaturą inicjacji *bubble effect* w próbkach celulozy zanurzonych w estrze syntetycznym Midel 7131 i w takich samych próbkach zanurzonych w oleju mineralnym Orlen Trafo eN wyniosła 5,7°C (więcej o 4,1% w odniesieniu do próbek zanurzonych w oleju mineralnym). Wzrost temperatury inicjacji *b.e.* w pozostałych materiałach izolacyjnych wynosi 2,9% dla próbek Nomex[®] 910 oraz 3,4% dla próbek Nomex[®] 926.

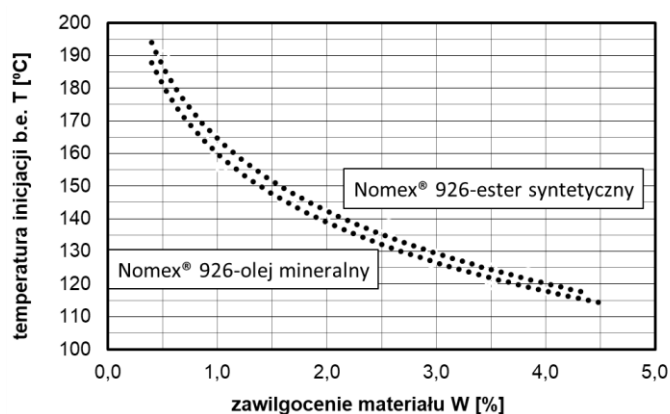
Wyniki eksperymentu potwierdziły hipotezę 3, brzmiącą „W układzie izolacyjnym aramid-dielektryk ciekły zastąpienie oleju mineralnego estrem syntetycznym powinno powodować wzrost temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania”. Stwierdzono wyższą temperaturę inicjacji *b.e.* wszystkich badanych próbek materiałów stałych zanurzonych w estrze syntetycznym w porównaniu do zanurzenia ich w oleju mineralnym, co należy powiązać z wyższą przenikalnością elektryczną estru syntetycznego ($\epsilon_w = 3,2$) od przenikalności oleju mineralnego ($\epsilon_w = 2,2$).



a)



b)



c)

Rys. 4.12. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w oleju mineralnym Orlen Trafo eN oraz estrze syntetycznym Midel 7131: a) papieru celulozowego typu Kraft, b) Nomex[®] 910, c) Nomex[®] 926

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że trzy potwierdzone w pracy podtezy złożyły się na potwierdzenie tezy głównej, o treści „Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w złożonych układach izolacyjnych zależy w istotny sposób od polarności komponentów tworzących układ izolacyjny”.

4.6 Wyznaczenie równań matematycznych opisujących temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania

Na podstawie uzyskanych wyników badań wyznaczono, z użyciem regresji nieliniowej, równania wiążące temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania z zawilgoceniem próbki materiału izolacji stałej dla dwóch cieczy, w której jest ona zanurzona (tablica 4.3). Użyte zostały równania logarytmiczne, ponieważ charakteryzują się one bardzo dobrym dopasowaniem do wyników pomiarów (współczynnik determinacji miał wartość od 0,9811 do 0,9888).

Tab. 4.3 Równania przedstawiające zależność temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania T od zawilgocenia W badanego materiału stałego zanurzonego dla dwóch cieczy izolacyjnych

Izolacja stała	Izolacja ciekła	Równanie $T = f(W)$	Współczynnik determinacji R^2	Numer równania
Papier celulozowy Kraft	Olej mineralny	$T = -29,90 \ln(W) + 172,46$	0,9854	(4.1)
Papier celulozowy Kraft	Ester syntetyczny	$T = -32,60 \ln(W) + 180,39$	0,9833	(4.2)
Nomex [®] 910	Olej mineralny	$T = -30,49 \ln(W) + 165,46$	0,9811	(4.3)
Nomex [®] 910	Ester syntetyczny	$T = -30,98 \ln(W) + 171,14$	0,9888	(4.4)
Nomex [®] 926	Olej mineralny	$T = -30,42 \ln(W) + 160,00$	0,9873	(4.5)
Nomex [®] 926	Ester syntetyczny	$T = -32,01 \ln(W) + 164,56$	0,9851	(4.6)

4.7 Wyniki badań a zalecenia normy IEC 60076-14

Istotnym aspektem eksploatacji transformatorów jest ich dopuszczalna temperatura pracy. W literaturze można znaleźć próbę interpretacji dopuszczalnych limitów w aspekcie narażenia na wystąpienie *bubble effect* [12]. Rozważania te dotyczą jednak, przede wszystkim, konwencjonalnych układów izolacyjnych. W pracy wskazano na brak takich danych dla izolacji wysokotemperaturowej.

W tabelicy 4.4 przedstawiono uzyskane w trakcie badań wartości temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania materiału Nomex[®] 910 oraz Nomex[®] 926 zestawione z wymaganiami normy [13]. Barwą czerwoną zaznaczono układy izolacyjne, których temperatura pracy jest wyższa, a zieloną te, których jest ona niższa od temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania zbadanych materiałów. Dla celów porównawczych wybrano wyniki dla próbek materiałów o zawilgoceniu zbliżonym do spotykanego w praktyce eksploatacyjnej transformatorów energetycznych: 2,04% dla Nomex[®] 910 oraz 1,66% dla Nomex[®] 926, co odpowiada zawilgoceniu 2,38% celulozy kondycjonowanej w tych samych warunkach klimatycznych.

Tab. 4.4 Zestawienie wybranych wartości temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania oraz dopuszczalnej temperatury pracy wysokotemperaturowych układów izolacyjnych [13]

Parametr	Rodzaj układu izolacyjnego			
	Półhybrydowy*	Mieszany hybrydowy*	Pełny hybrydowy*	Wysokotemperaturowy**
Temperatura gorącego punktu przy normalnym obciążeniu [°C]	140	150	165	190
Temperatura gorącego punktu przy długotrwałym awaryjnym przeciążeniu [°C]	150	160	175	200
Temperatura gorącego punktu przy krótkotrwałym awaryjnym przeciążeniu [°C]	170	180	195	220
Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania materiału Nomex® 910 zawilgoconego do wartości 2,04% [°C]	148,5			
Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania materiału Nomex® 926 zawilgoconego do wartości 1,66% [°C]	145,5			

* układ izolacyjny zbudowany zarówno z materiałów konwencjonalnych jak i wysokotemperaturowych

** układ izolacyjny składający się tylko z materiałów wysokotemperaturowych

Jak wynika z danych w tablicy 4.4, dopuszczalna temperatura gorącego punktu (ang. *hot-spot*) przy normalnym obciążeniu nie jest przekroczona tylko dla układu półhybrydowego. Dopuszczalna temperatura pracy pozostałych układów izolacyjnych jest wyższa niż temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania. Wynika z tego, że stosowanie normatywnie dopuszczalnej temperatury pracy takich układów jest niebezpieczne, gdyż nie chroni przed wystąpieniem zjawiska bąbelkowania w gorącym punkcie uzwojenia transformatora.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że temperaturowy rozpad aramidów nie powoduje powstawania cząsteczek wody [14]. Z tego powodu w wysokotemperaturowej izolacji eksploatowanych transformatorów powstaje mniej wody niż w celulozie, przez co skutki zjawiska bąbelkowania mogą być w nich mniej groźne. Układy izolacyjne składające się tylko z wysokotemperaturowych materiałów są jednak niezwykle rzadko spotykane, co wynika z ich wysokiej ceny. Aktualnie, wysokotemperaturowe materiały izolacyjne stosuje się jedynie w gorących punktach transformatora, co sprawia, że woda generowana wskutek

rozpadu celulozy, stanowiącej pozostałą część izolacji uzwojeń, może zostać zaadsorbowana przez izolację aramidową. W wyniku tego narażenie na wystąpienie *bubble effect* jest wyższe w układach półhybrydowych oraz hybrydowych, niż w układach składających się tylko z materiałów wysokotemperaturowych.

5. Istotny wkład naukowy rozprawy

W rozprawie doktorskiej dokonano analizy zjawiska bąbelkowania w papierze celulozowym typu Kraft oraz w wysokotemperaturowych materiałach izolacyjnych zbudowanych na bazie aramidu, typu Nomex[®] 910 oraz Nomex[®] 926. W badaniach wykorzystano dwie cieczy elektroizolacyjne: olej mineralny Orlen Trafo eN oraz ester syntetyczny Midel 7131. Ze względu na rosnące zainteresowanie materiałami wysokotemperaturowymi konieczne jest dobre poznanie ich właściwości. W literaturze do tej pory brak było wzmianek dotyczących temperatury inicjacji *bubble effect* w tych materiałach, a przeprowadzone badania pozwoliły na uzupełnienie tej luki.

Ponadto, autor wyznaczył równania matematyczne pozwalające w szybki sposób obliczyć temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania w zależności od użytego materiału izolacyjnego (papier celulozowy Kraft, Nomex[®] 910, Nomex[®] 926), jego zawilgocenia oraz cieczy elektroizolacyjnej (olej mineralny Orlen Trafo eN, ester syntetyczny Midel 7131).

Przedstawione wyniki badań mają charakter praktyczny i mogą być wykorzystane w celu ograniczenia ryzyka wystąpienia w *bubble effect* w transformatorach energetycznych.

Istotnym wkładem autora pracy jest analiza zjawiska bąbelkowania w nowoczesnym materiale Nomex[®] 910, który stanowi kompozyt celulozy oraz aramidu. Badania wykazały, że materiał ten charakteryzuje się wyższą temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania niż papier celulozowy Kraft oraz papier aramidowy Nomex[®] 926, co jest jego istotną zaletą.

Autor dokonał również analizy wyników badań w kontekście aktualnie obowiązującej normy dotyczącej obciążalności termicznej materiałów wysokotemperaturowych [13]. W literaturze problem ten wydaje się być zauważony przez niektórych autorów [11], jednak, ze względu na brak wystarczającej ilości danych, dotychczas został przeanalizowany pobieżnie. Niniejsza praca wypełniła tę lukę.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania skupiały się na pomiarze temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w wysokotemperaturowych materiałach izolacyjnych współpracujących z dwiema cieczami izolacyjnymi.

Autor rozprawy postawił tezę główną, brzmiącą: „*Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w złożonych układach izolacyjnych zależy w istotny sposób od polarności komponentów tworzących układ izolacyjny*” oraz prowadzące do niej trzy podtezy. W celu ich potwierdzenia przeprowadzono badania eksperymentalne, polegające na pomiarze temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w różnych konfiguracjach układu izolacyjnego, składających się z papieru celulozowego typu Kraft, papieru aramidowego (Nomex[®] 926) i papieru będącego kompozytem aramidu i celulozy (Nomex[®] 910), współpracujących z olejem mineralnym Orlen Trafo eN oraz estrem syntetycznym Midel 7131.

W celu uzyskania różnego zawilgocenia badane materiały stałe zostały najpierw poddane procesowi suszenia próżniowego a następnie zawilgacania w komorze klimatycznej. Wykorzystane w badaniach materiały stałe oraz ciecze izolacyjne przed pomiarami zostały odgazowane w komorze próżniowej.

Spśród zbadanych materiałów stałych o takim samym zawilgoceniu zanurzonych w oleju mineralnym Orlen Trafo eN jak i estrze syntetycznym Midel 7131 papier celulozowy typu Kraft charakteryzuje się najwyższą temperaturą inicjacji *bubble effect*. Najniższą temperaturę inicjacji zjawiska miał papier aramidowy Nomex[®] 926. Wyniki badań próbek materiału Nomex[®] 910 (mieszana kompozytu z obu materiałów) plasowały się pomiędzy nimi. Przykładowo, Nomex[®] 910, o zawilgoceniu na poziomie 2%, zanurzony w oleju mineralnym charakteryzuje się temperaturą inicjacji *bubble effect* niższą o ok. 4,9% od celulozy, natomiast Nomex[®] 926 o takim samym zawilgoceniu, niższą o ok. 8,6%. W estrze syntetycznym, również w przypadku próbek o zawilgoceniu 2%, temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiale Nomex[®] 910 jest o ok. 5,1% niższa od celulozy, a w Nomex[®] 926 jest niższa o ok. 9,8%. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły podtezę 1, o treści „*Zastąpienie celulozy aramidem, który jest materiałem o mniejszej polarności, powinno powodować obniżenie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania*”.

Materiały zawierające aramid przygotowywane do badań w tych samych warunkach klimatycznych zawilgocily się w mniejszym stopniu niż celuloza, co jest związane z mniejszą polarnością tworzących je włókien aramidowych. Jest to niezwykle istotne w kontekście zjawiska bąbelkowania. Uwzględnienie różnego zawilgocenia materiałów uzyskanego

podczas ich zawilgacania w tych samych warunkach klimatycznych znacząco zmniejsza różnicę pomiędzy temperaturą inicjacji *bubble effect* w badanych materiałach (rysunek 4.9 oraz 4.10). Z przeprowadzonych badań wynika, że temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiale Nomex[®] 910 jest wyższa niż w celulozie oraz Nomex[®] 926. Wyniki badań potwierdziły podtezę 3, o treści „*Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach stanowiących kompozycję włókien aramidowych i celulozowych powinna być wyższa niż w materiałach zawierających tylko włókna celulozowe albo aramidowe.*”. Wyjaśnienie tego zjawiska zostało przedstawione w rozdziale 4.4 i jest skutkiem bliskiej obecności w kompozycie włókien aramidu i celulozy.

Zbadanie zjawiska bąbelkowania w materiale Nomex[®] 910 stanowi istotny wkład naukowy niniejszej rozprawy.

Analizując wykresy z rysunku 4.12 można zauważyć, że temperatura inicjacji *b.e.* każdego zbadanego materiału stałego jest wyższa w estrze syntetycznym niż w oleju mineralnym. Wyniki tych badań potwierdziły podtezę 2, o treści „*W układzie izolacyjnym aramid-dielektryk ciekły, zastąpienie oleju mineralnego estrem syntetycznym powinno powodować wzrost temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania.*”. Wynika to z tego, że energia wiązań estru (o $\varepsilon_w=3,2$) w układzie z zawilgoconym materiałem stałym jest większa, niż energia wiązań w układzie z olejem mineralnym (o $\varepsilon_w=2,2$), co sprawia, że uwolnienie wody z materiału zanurzonego w estrze syntetycznym MIDEL 7131 wymaga wyższej temperatury, niż w przypadku zanurzenia go w oleju mineralnym.

Opracowane przez autora rozprawy równania pozwalają na wyznaczenie temperatury inicjacji *bubble effect* w zbadanych układach izolacyjnych.

Skonfrontowanie przez autora rozprawy wyników badań temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania z zaleceniami normy IEC 60076-14 [95], określającej dopuszczalną temperaturę pracy wysokotemperaturowych układów izolacyjnych, wykazało, że w transformatorach eksploatowanych zgodnie z przytoczoną normą może wystąpić *bubble effect*. Zjawisko to jest jednak mniej intensywne w przypadku materiałów zawierających aramid.

Zdaniem autora, w wyniku przeprowadzonych badań zostały potwierdzone trzy podtezy, co sumarycznie doprowadziło do potwierdzenia tezy głównej rozprawy, o treści „*Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w złożonych układach izolacyjnych zależy w istotny sposób od polarności komponentów tworzących układ izolacyjny*”.

7. Dorobek naukowy autora

Publikacje

- [1] Lewandowski K., *Zasady poprawnego wykonywania pomiarów transformatorów energetycznych przy użyciu metody SFRA*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, No 95, 2018, 163-174, punktacja MNiSW: 9,0
- [2] Lewandowski K. Morańda H., *Wykrywanie zwarcí zwojowych w transformatorze energetycznym przy użyciu metody SFRA*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 94, Nr 10/2018, 118-121, punktacja MNiSW: 14,0
- [3] Lewandowski K., Morańda H., *Analiza możliwości wykrywania miejsca zwarcia zwojowego w transformatorze energetycznym na podstawie jego odpowiedzi częstotliwościowej (SFRA)*, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, No 98, 2019, 53-63, punktacja MNiSW: 5,0
- [4] Lewandowski K. Morańda H., *Analiza odpowiedzi częstotliwościowej (SFRA) transformatora energetycznego o mocy 25 MVA po wystąpieniu zwarcia zwojowego*, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, No 98, 2019, 89-100, punktacja MNiSW: 5,0
- [5] Lewandowski K., Morańda H., *Analysis of possibility of shorted coil localization in power transformer on the basis of its frequency response (SFRA)*, ITM Web of Conferences, vol 28, 2019, 01029-1-01029-2, punktacja MNiSW: 5,0
- [6] Orwat B., Szyling J., Kownacki I., Lewandowski K., Morańda H., *Badanie wpływu procesu separacji oleju mineralnego od estru syntetycznego metodami ewaporacyjnymi na jego podstawowe parametry elektryczne oraz właściwości sorpcyjne względem wody*, Materiały pokonferencyjne, Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa Transformator'19, Toruń, 2019, 169-176, rozdział w monografii naukowej
- [7] Lewandowski K. Morańda H., *Zjawisko bąbelkowania w izolacji stałej transformatorów wykonanej na bazie celulozy oraz aramidu (Nomex[®] 926) zanurzonej w oleju mineralnym i estrze syntetycznym Midel 7131*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 98, Nr 10/2022, 119-123, punktacja MNiSW: 70,0
- [8] Gielniak J. Czerniak M., Lewandowski K., *Badanie drgań transformatorów o mocy 10, 16, 25 i 40 MVA pod kątem oceny ich stanu technicznego*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 98, Nr 10/2022, 169-172, punktacja MNiSW: 70,0

Udział w projektach naukowych

1. 04/41/SBAD/4416, *Badanie wpływu separacji metodą ewaporacyjną oleju mineralnego od estru syntetycznego na wybrane właściwości fizykochemiczne estru*, grant naukowy Politechniki Poznańskiej, 01.04.2019 – 30.11.2020, budżet 2 089,29 zł, kierownik grantu.
2. 04/41/NCBR/4359, *Mobilny system suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego*, POIR.04.01.02-00-004/17-00, 01.07.2018 – 01.07.2021, budżet 6 799 094,64 zł, konsorcjum Politechnika Poznańska we współpracy z Centrum Zaawansowanych Technologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza i firmą Ad Moto Rafał Zawisz, wykonawca projektu.

Literatura

- [1] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, Energopomiar-Elektryka, Gliwice, 2012.
- [2] DuPont Nomex® 926 Technical Data Sheet, 04.2016.
- [3] Szewczyk R., Papier izolacyjny wzmocniony aramidem – właściwości i zastosowania, Urządzenia dla Energetyki, 2, 2019, str. 47-54.
- [4] Marek R.P., Wicks R.C., Galhardo L., Szewczyk R., New cellulose paper enhanced with aramid – practical example of material thermal evaluation acc. to IEEE Std C57, SCD1 Colloquium Trends in Technology, Materials, Testing and Diagnostics Applied to Electric Power Systems, Philadelphia, Rio de Janeiro, Brazil, 2015.
- [5] Przybyłek P., A comparison of bubble evolution temperature in aramid and cellulose paper, 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics ICSD, Italy, 30 June 2013 - 04 July 2013, pp. 983-986.
- [6] Qin C., He Y., Shi B., Zhao T., Lv F., Cheng X., Experimental Study on Breakdown Characteristics of Transformer Oil Influenced by Bubbles, Energies, 11, 3, 634, 2018, pp. 1-11.
- [7] Przybyłek P., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Zjawisko „bubble effect” w izolacji papierowo-olejowej o różnym stopniu zawilgocenia i zesterzenia, PAK, vol. 55, nr 1, 2009, str. 44-46.
- [8] Przybyłek P., Nadolny Z., Mościcka-Grzesiak H., Bubble Effect as a Consequence of Dielectric Losses in Cellulose Insulation, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 3, June 2010.
- [9] Perkasa C.Y., Lelekakis N., Czaszejko T., Wijaya J., Martin D., A comparison of the Formation of Bubbles and Water Droplets in Vegetable and Mineral Oil Impregnated Transformer Paper, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 5, October 2014.
- [10] Oommen T.V., Lindgren S.R., Bubble Evolution from Transformer Overload, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives, vol. 1, 2001, pp. 137-142.
- [11] Hill J., Wang Z.D., Liu Q., Krause Ch., Walker D., Review of Experiments Investigating Transformer Insulation Condition on Bubble Inception Temperature, 12th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an, China, 2018.
- [12] Hill J., Wang Z., Liu Q., Krause Ch., Wilson G., Analyzing the power transformer temperature limitation for avoidance of bubble formation, High Voltage, Vol. 4, Iss. 3, 2019, pp. 210-216.
- [13] IEC 60076-14:2013, Power transformers – Part. 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials, October 2013.
- [14] Kassi K.S., Fofana I., Meghnefi F., Yeo Z., Impact of Local Overheating on Conventional and Hybrid Insulations for Power Transformers, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 5, October 2015, pp. 2543-2553.