

Dr inż. Grzegorz Dombek

Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: grzegorz.dombek@put.poznan.pl

Dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

Instytut Elektroenergetyki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: zbigniew.nadolny@put.poznan.pl

Właściwości cieplne mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych w aspekcie zastosowania w transformatorach dużej mocy

Słowa kluczowe: transformatory energetyczne, estry naturalne, estry syntetyczne, współczynnik przejmowania ciepła

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości cieplnych mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych, w aspekcie ich zastosowania w układzie chłodzenia transformatora wysokiego napięcia w trakcie jego eksploatacji. Badanymi właściwościami analizowanej mieszaniny były przewodność cieplna właściwa λ , lepkość kinematyczna ν , gęstość ρ , ciepło właściwe c_p oraz rozszerzalność cieplna β . W oparciu o przedstawione wyniki badań określono współczynnik przejmowania ciepła α mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych. Współczynnik ten określa zdolność cieczy elektroizolacyjnej do transportu ciepła w transformatorze, warunkując tym samym jego niezawodność. Do badań wykorzystano następujące procentowe proporcje mieszaniny obu estrów: 100/0, 95/5, 80/20, 50/50, 20/80, 5/95, 0/100. Pomiarów przeprowadzono dla temperatury: 25°C, 40°C, 60°C i 80°C.

1. Wprowadzenie

Transformator energetyczny jest jednym z najważniejszych urządzeń elektroenergetycznych. Kluczowym jego elementem jest układ izolacyjny, od którego jakości zależy długoletnia eksploatacja oraz niezawodność transformatora. Znaczna większość użytkowanych transformatorów wypełniona jest cieczami elektroizolacyjnymi. Ze względu na swoje dobre właściwości dielektryczne ciecze te pełnią rolę izolacji elektrycznej. Ponadto, wykazują się one również korzystnymi właściwościami cieplnymi (przewodność cieplna, lepkość, ciepło właściwe, gęstość i rozszerzalność cieplna) co sprawia, że spełniają również rolę medium chłodzącego [13, 26]. Biorąc pod uwagę fakt, iż transport ciepła odbywa się na drodze: źródło ciepła → papier zaimpregnowany cieczą → ciecz elektroizolacyjna → kadź → powietrze, właściwości cieplne cieczy wypełniającej wewnątrz transformatora mają duże znaczenie w procesie tej wymiany [4, 14-16].

Najczęściej stosowaną w transformatorach cieczą elektroizolacyjną, ze względu na niską cenę oraz bardzo dobrze rozpoznane właściwości, jest olej mineralny [10, 20, 26, 32]. Jednakże coraz bardziej restrykcyjne przepisy oraz wymagania dotyczące niezawodności urządzeń elektroenergetycznych wypełnionych cieczami przyczyniają się do ograniczenia

jego dominacji [2, 6, 7, 17, 18, 23]. W związku z tym ośrodki badawcze na całym świecie prowadzą liczne badania nad alternatywnymi dla oleju mineralnego cieczami. Zalicza się do nich przede wszystkim estry syntetyczne oraz estry naturalne [3, 4, 12, 21]. Ciecze te charakteryzuje szereg cech, które w odniesieniu do oleju mineralnego uznawane są za ich zalety. Zaliczają się do nich przede wszystkim walory ekologiczne, takie jak biodegradowalność i nietoksyczność, jak również bezpieczeństwo eksploatacji związane z wysoką temperaturą zapłonu oraz palenia [12, 21].

Ostatnimi czasy coraz bardziej popularny staje się proces wymiany cieczy elektroizolacyjnej wypełniającej transformator na inną (ang. *retrofilling*). Z zjawiskiem tym mamy do czynienia, gdy transformator wypełniony do tej pory jedną cieczą (zazwyczaj olejem mineralnym) zostaje w trakcie remontu napełniony inną cieczą (najczęściej estrami syntetycznymi lub naturalnymi) [8, 18]. Proces *retrofilling*'u nie gwarantuje całkowitego usunięcia pierwotnej cieczy, gdyż niewielka jej ilość pozostaje w nasyconej izolacji papierowej, uzwojeniach, rdzeniu oraz w innych trudnodostępnych szczelinach transformatora. Powstaje wówczas, w sposób niezamierzony, mieszanina składająca się z pozostałości pierwotnej cieczy (której ilość nie przekracza 8%) oraz cieczy nowej, którą napełniana jest modernizowana jednostka, jak opisali to Fofana i in. w [8]. Prowadzone są również badania dotyczące świadomego zastosowania dwóch lub więcej cieczy elektroizolacyjnych w celu otrzymania mieszaniny charakteryzującej się lepszymi właściwościami w stosunku do cieczy bazowych. Badania te dotyczą przeważnie mieszanin oleju mineralnego z estrami syntetycznymi, bądź naturalnymi [6, 7, 10, 11, 17, 22, 23, 27, 30].

Badania nad mieszaninami, które prowadzone są aktualnie w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie, dotyczą głównie ich właściwości elektrycznych, a nie cieplnych, co nie jest podejściem właściwym. Należy mieć na uwadze, że zastosowanie mieszanin cieczy elektroizolacyjnych, które w stosunku do cieczy bazowych charakteryzują się lepszymi właściwościami elektrycznymi oraz gorszymi właściwościami cieplnymi, skutkować będzie przyspieszeniem procesu starzenia układu izolacyjnego transformatora wynikającego z podwyższonej temperatury pracy. W konsekwencji wpłynie to na skrócenie czasu jego eksploatacji. W związku z tym, badania nad mieszaninami powinny dążyć do skorelowania ich właściwości elektrycznych, fizyko-chemicznych oraz cieplnych, jak opisali to Nadolny i in. w [19]. Próbę taką podjęli Dua i in. w [5], w którym analizowali możliwość zastosowania mieszanin cieczy elektroizolacyjnych przy uwzględnieniu ich najważniejszych właściwości. Jednakże przy braku pełnych informacji dotyczących właściwości cieplnych mieszanin takie podejście może okazać się trudne lub niemożliwe do zrealizowania.

Jak wcześniej wspomniano znacząca liczba artykułów odnoszących się do mieszanin cieczy elektroizolacyjnych przedstawia wyniki badań nad ich właściwościami elektrycznymi. W pracach [6, 27, 29, 30] autorzy przedstawiają wyniki badań dotyczące wpływu proporcji oleju i estrów oraz poziomu zesterzenia na takie wielkości elektryczne jak współczynnik strat dielektrycznych $\tan(\delta)$, przenikalność elektryczna oraz napięcie przebicia. Z kolei Suwarno w [28] przedstawił wpływ starzenia cieplnego mieszaniny oleju mineralnego i estru naturalnego na takie właściwości elektryczne jak napięcie przebicia, rezystywność, współczynnik strat dielektrycznych oraz przenikalność elektryczną. Ponadto, Trnka i in. w [31] przedstawili wyniki badań dotyczące biodegradowalności mieszanin oleju mineralnego i estru naturalnego. Natomiast McShane i in. w [18] podają również informacje dotyczące wpływu proporcji oleju mineralnego i estru naturalnego na temperaturę zapłonu i palenia oraz temperaturę płynięcia.

W literaturze brak jest kompletnych informacji dotyczących właściwości cieplnych mieszanin cieczy elektroizolacyjnych. Dostępne są jedynie dane dotyczące wybranych właściwości cieplnych mieszanin oleju mineralnego z estrami syntetycznymi oraz mieszanin oleju mineralnego z estrami naturalnymi. W pozycjach [23, 30] znaleźć można informacje

dotyczące lepkości mieszaniny oleju mineralnego i estrów syntetycznych w zależności od ich proporcji. Autorzy podają również informacje dotyczące wpływu temperatury na lepkość mieszanin, w których zawartość oleju mineralnego wynosi 20% i 80%. Z kolei McShane i in w [18] przedstawiają informacje dotyczące lepkości mieszaniny oleju mineralnego i estrów naturalnych w zależności od ich proporcji. Jednakże dane te przedstawione zostały jedynie dla mieszanin, których temperatura wynosi 40°C i 100°C. W pozycjach [27, 29] znaleźć można dane dotyczące wpływu temperatury oraz proporcji na gęstość mieszanin bazujących na oleju mineralnym i estrach naturalnych.

Widoczny jest zatem brak badań w zakresie właściwości cieplnych mieszanin cieczy elektroizolacyjnych. Jak wynika z przytoczonych pozycji literaturowych dostępne są jedynie niepełne informacje dotyczące lepkości oraz gęstości mieszanin oleju mineralnego z estrami. Brak jest istotnych informacji dotyczących wpływu temperatury oraz proporcji na pozostałe właściwości cieplne, do których zaliczamy przewodność cieplną, ciepło właściwe oraz rozszerzalność cieplną. Ponadto nie są dostępne dane dotyczące mieszanin estrów syntetycznych i naturalnych.

Niezależnie od sposobu powstawania mieszaniny, celem jej zastosowania jest poprawa właściwości cieczy elektroizolacyjnych. Zatem badania dotyczące właściwości mieszanin różnych cieczy elektroizolacyjnych są kluczowe z punktu widzenia ich wpływu na okres eksploatacji transformatora oraz dostosowania ich do istniejących standardów i regulacji. Ponadto, istotną kwestią jest również zgodność powstałej mieszaniny z pozostałymi materiałami tworzącymi układ izolacyjny transformatora, gdyż tylko taka mieszanina pozwoli na wydłużenie jego okresu eksploatacji i niezawodną pracę. W związku z tym kompletne informacje na temat właściwości cieplnych mieszanin cieczy elektroizolacyjnych są pożądane, a także pozwolą uzupełnić brakującą wiedzę z zakresu właściwości nowych cieczy elektroizolacyjnych, czemu poświęcony jest niniejszy artykuł.

2. Cel i zakres badań

Celem podjętych badań było określenie wpływu proporcji estrów syntetycznych z estrami naturalnymi na właściwości cieplne powstałej mieszaniny. Zakres badań obejmował pomiar właściwości cieplnych powstałej mieszaniny takich, jak: przewodność cieplna właściwa λ , lepkość kinematyczna ν , ciepło właściwe c_p , gęstość ρ oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej β . Właściwości te warunkują zdolność cieczy do transportu ciepła – współczynnik przejmowania ciepła α . Współczynnik przejmowania ciepła α określony został na podstawie równania przedstawionego przez Dombek i Nadolny w [4]:

$$\alpha = \sqrt[n+1]{c \cdot \lambda^{1-n} \cdot g^n \cdot \delta^{3n-1} \cdot \beta^n \cdot \rho^n \cdot c_p^n \cdot \nu^{-n} \cdot q^n} \quad (1)$$

gdzie: α – współczynnik przejmowania ciepła [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], c , n – stałe zależne od charakteru przepływu, temperatury i geometrii, λ – przewodność cieplna [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], g – przyspieszenie ziemskie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], δ – wymiar charakterystyczny [m], β – rozszerzalność cieplna [K^{-1}], ρ – gęstość [$\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$], c_p – ciepło właściwe [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], ν – lepkość kinematyczna [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], q – powierzchniowe obciążenie cieplne [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

Do pomiarów wyżej wymienionych właściwości wykorzystano estry syntetyczne o nazwie Midel 7131 produkowane przez firmę M&I Materials oraz estry naturalne o nazwie Envirotemp FR3 wytwarzane przez firmę Cargil. Pomiaru właściwości przeprowadzone zostały zgodnie z normami [1, 9, 24, 25], przy wykorzystaniu układów pomiarowych, które wcześniej zostały przetestowane na cieczach elektroizolacyjnych o znanych z literatury właściwościach cieplnych. Do realizacji badań przygotowano mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych o następujących procentowych stężeniach obu estrów: 100/0, 95/5, 80/20, 50/50, 20/80, 5/95 i 0/100. Pomiaru przeprowadzono dla temperatury 25°C, 40°C, 60°C i 80°C. Wyniki badań przedstawione zostały w kolejnym rozdziale.

3. Wyniki pomiarów

3.1. Przewodność cieplna λ mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

W tabeli 1 i na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiaru przewodności cieplnej właściwej λ mieszaniny estrów syntetycznych i naturalnych dla różnych wartości temperatury. Wraz ze wzrostem zawartości estrów naturalnych rośnie przewodność cieplna mieszaniny. Przewodność λ wzrosła o 15,2% (dla 25°C), o 15,4% (dla 40°C), o 16,3% (dla 60°C) i o 15,9% (dla 80°C). Wzrost ten był niezależny od temperatury. Przyczyną wzrostu przewodności cieplnej jest większa λ estrów naturalnych w porównaniu do estrów syntetycznych [4]. W estrach naturalnych, ze względu na silniejsze oddziaływanie ze sobą cząsteczek, odległości między nimi są mniejsze niż w przypadku estru syntetycznego, zatem przekazywanie energii kinetycznej jest ułatwione. Oznacza to, że im większa zawartość estrów naturalnych, tym mieszanina będzie miała większą przewodność cieplną, co może korzystnie wpłynąć na zdolność mieszaniny do transportu ciepła w transformatorze.

Wraz ze wzrostem temperatury zauważalny jest również spadek przewodności cieplnej analizowanych mieszanin. Spadek ten spowodowany jest wzrostem odległości pomiędzy cząsteczkami cieczy w wyniku czego utrudnione jest przekazywanie energii kinetycznej. W konsekwencji powoduje to obniżenie przewodności cieplnej analizowanych cieczy.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów wraz z linią trendu, równaniem modelu aproksymacyjnego oraz współczynnikiem determinacji. Wyniki aproksymowano równaniem liniowym:

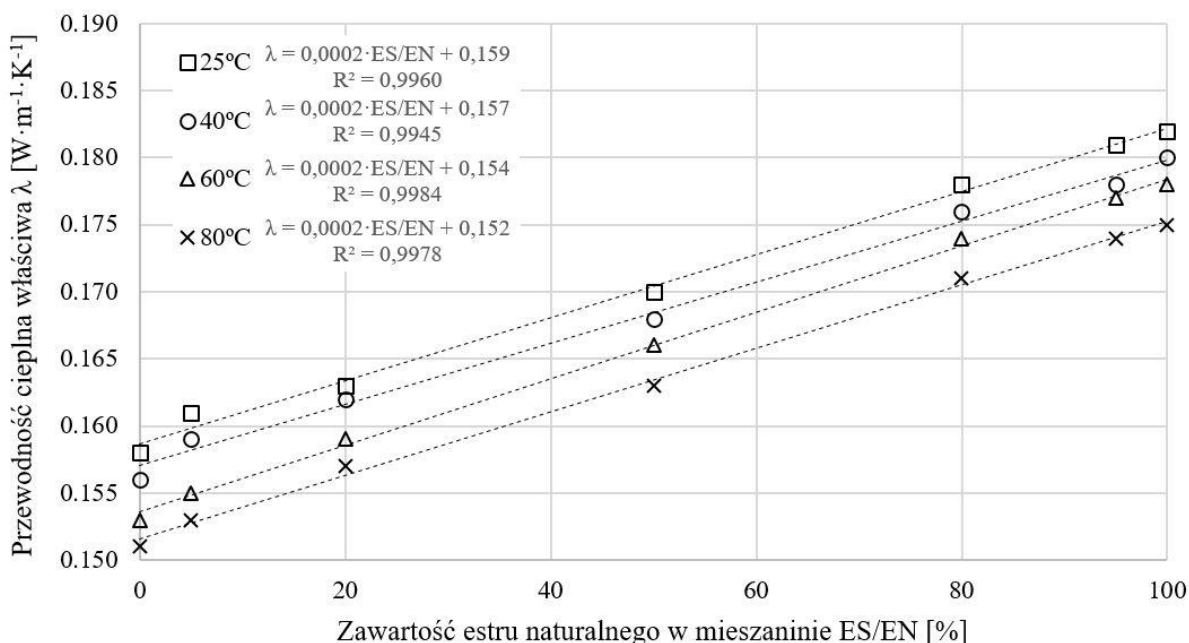
$$\lambda = a \cdot ES / EN + b \quad (2)$$

gdzie: a , b – stałe będące parametrami materiałowymi mieszaniny ES/EN. Stała a jest równa tangensowi kąta nachylenia prostej do osi rzędnych. Stała ta określa zmiany przewodności cieplnej λ mieszaniny ES/EN wywołane zawartością estru naturalnego. Stała b jest równa przewodności cieplnej właściwej λ dla zawartości estru naturalnego w mieszaninie ES/EN równej 0%.

Wyniki pomiarów i obliczeń pozostałych właściwości cieplnych (podrozdziały 3.2-3.6), podobnie jak w przypadku przewodności cieplnej właściwej λ , aproksymowano również funkcją liniową.

Tabela 1. Wyniki pomiarów przewodności cieplnej λ mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

Przewodność cieplna λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]							
Temperatura	Proporcja estrów syntetycznych (ES) i estrów naturalnych (EN)						
	100% ES 0% EN	95% ES 5% EN	80% ES 20% EN	50% ES 50% EN	20% ES 80% EN	5% ES 95% EN	0% ES 100% EN
25°C	0,158	0,161	0,163	0,170	0,178	0,181	0,182
40°C	0,156	0,159	0,162	0,168	0,176	0,178	0,180
60°C	0,153	0,155	0,159	0,166	0,174	0,177	0,178
80°C	0,151	0,153	0,157	0,163	0,171	0,174	0,175



Rys. 1. Przewodność cieplna λ mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

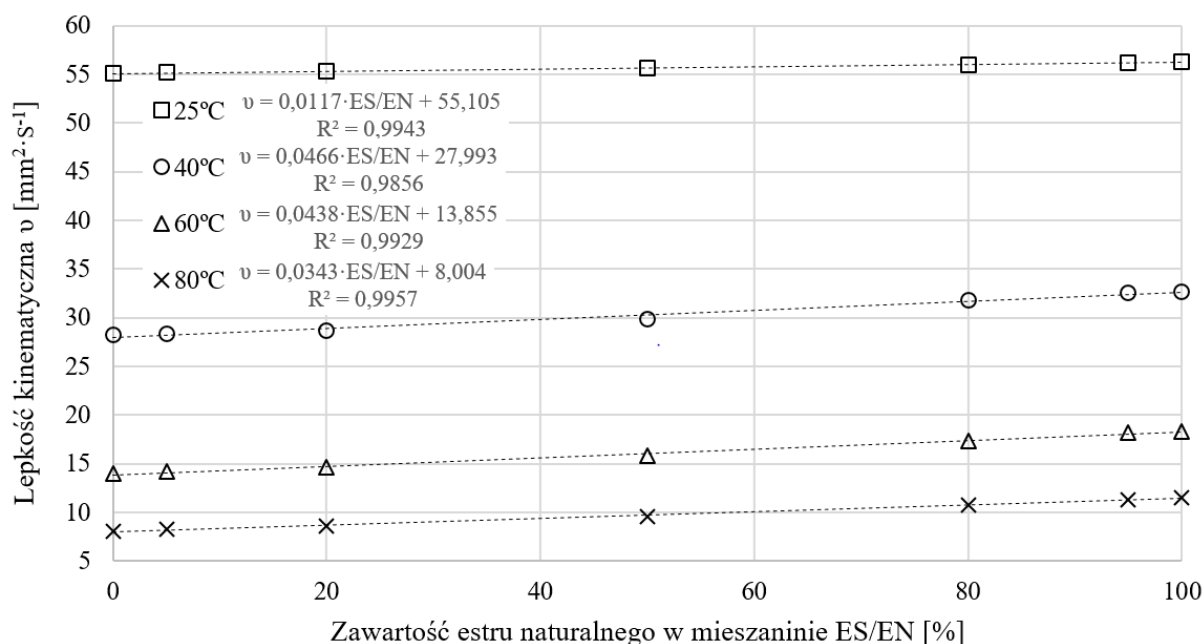
3.2. Lepkość kinematyczna ν mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

W tabeli 2 i na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów lepkości kinematycznej ν mieszaniny estrów syntetycznych i naturalnych. Jak pokazano, wraz ze wzrostem zawartości estrów naturalnych, rośnie lepkość mieszaniny o odpowiednio 2,1% (dla 25°C), o 15,6% (dla 40°C), o 30,5% (dla 60°C) i o 41,8% (dla 80°C). Wraz z podwyższaniem temperatury, wzrost lepkości mieszaniny, wywołany zwiększaniem zawartości estrów naturalnych, jest coraz wyraźniejszy. Spowodowane jest to wyższą lepkością estrów naturalnych, jak przedstawiają to Dombek i Nadolny w [4]. Lepkość kinematyczna cieczy wynika bezpośrednio z ich struktury chemicznej. Wyższa lepkość estrów naturalnych związana jest z silniejszymi oddziaływaniami międzycząsteczkowymi. Oddziaływania te w estrach naturalnych powodują, że siły tarcia wewnętrznego są większe niż w przypadku estrów syntetycznych. W związku z tym, wraz ze wzrostem zawartości estrów naturalnych, rośnie lepkość mieszaniny, co może negatywnie wpłynąć na zdolność mieszaniny do transportu ciepła w transformatorze.

Wraz ze wzrostem temperatury można zauważyć, że lepkość mieszaniny maleje. Spadek ten należy wiązać ze zmniejszeniem sił przyciągania działającego pomiędzy cząsteczkami cieczy na skutek wzrostu ich energii kinetycznej. Wzrost energii kinetycznej wywołany jest zwiększeniem temperatury. Z kolei w wyższej temperaturze cząsteczki poruszają się z większymi prędkościami, co osłabia siły międzycząsteczkowe i w efekcie powoduje zmniejszenie sił tarcia wewnętrznego i obniżenie lepkości.

Tabela 2. Wyniki pomiarów lepkości ν mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

Temperatura	Lepkość kinematyczna ν [mm ² ·s ⁻¹]						
	Proporcja estrów syntetycznych (ES) i estrów naturalnych (EN)						
	100% ES 0% EN	95% ES 5% EN	80% ES 20% EN	50% ES 50% EN	20% ES 80% EN	5% ES 95% EN	0% ES 100% EN
25°C	55,14	55,18	55,32	55,62	56,02	56,25	56,29
40°C	28,25	28,34	28,69	29,91	31,84	32,58	32,66
60°C	14,02	14,16	14,59	15,78	17,32	18,16	18,29
80°C	8,11	8,23	8,59	9,57	10,71	11,32	11,50



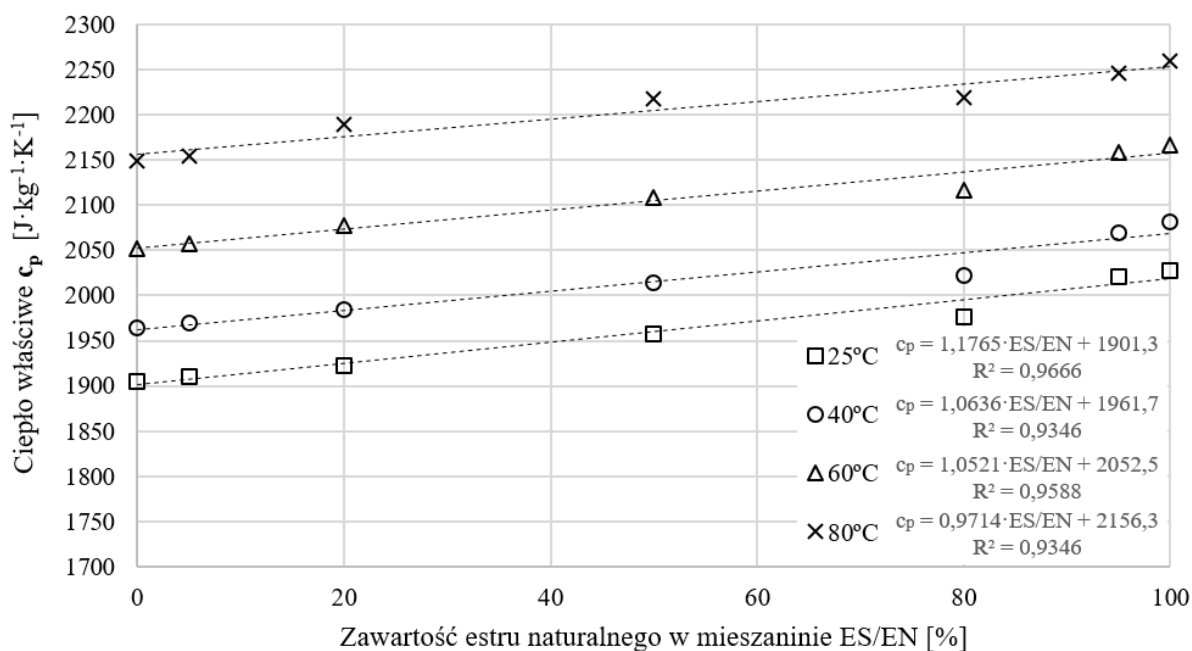
Rys. 2. Lepkość ν mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

3.3. Ciepło właściwe c_p mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

W tabeli 3 i na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiaru ciepła właściwego c_p mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych. Wraz ze wzrostem zawartości estrów naturalnych, ciepło właściwe mieszaniny nieco wzrosło. Ciepło właściwe wzrosło o 6,5% (dla 25°C), o 6,0% (dla 40°C), o 5,6% (dla 60°C) i o 5,1% (dla 80°C). Wraz z podwyższaniem temperatury, wzrost ciepła właściwego mieszaniny, wywołany zwiększeniem zawartości estrów naturalnych, minimalnie malał. Wzrost c_p mieszaniny wywołany jest większą wartością ciepła właściwego estrów naturalnych w porównaniu z ciepłem estrów syntetycznych. Ciepło właściwe związane jest z pojemnością cieplną określającą ilość energii jaką są w stanie przyjąć cząsteczki. Ponadto, pojemność cieplna jest funkcją stopni swobody cząsteczki. Wynika stąd, że im większe są cząsteczki, tym większą liczbą stopni swobody się charakteryzują. Cząsteczki estrów naturalnych są większe od cząsteczek estrów syntetycznych, przez co mogą przechowywać więcej energii. Im więcej energii cząsteczka może przyjąć, tym charakteryzuje się ona większą pojemnością cieplną. Z kolei im większa jest pojemność cieplna cieczy, tym większe jest jej ciepło właściwe. W konsekwencji wzrost zawartości estrów naturalnych spowodował wzrost ciepła właściwego mieszaniny, co może skutkować poprawą zdolności mieszaniny do transportu ciepła w transformatorze.

Tabela 3. Wyniki pomiarów ciepła właściwego c_p mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

Temperatura	Ciepło właściwe c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]						
	Proporcja estrów syntetycznych (ES) i estrów naturalnych (EN)						
	100% ES 0% EN	95% ES 5% EN	80% ES 20% EN	50% ES 50% EN	20% ES 80% EN	5% ES 95% EN	0% ES 100% EN
25°C	1905	1910	1923	1957	1977	2021	2028
40°C	1964	1969	1984	2014	2022	2069	2082
60°C	2052	2057	2078	2108	2117	2158	2166
80°C	2149	2154	2189	2218	2219	2246	2259



Rys. 3. Ciepło właściwe c_p mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

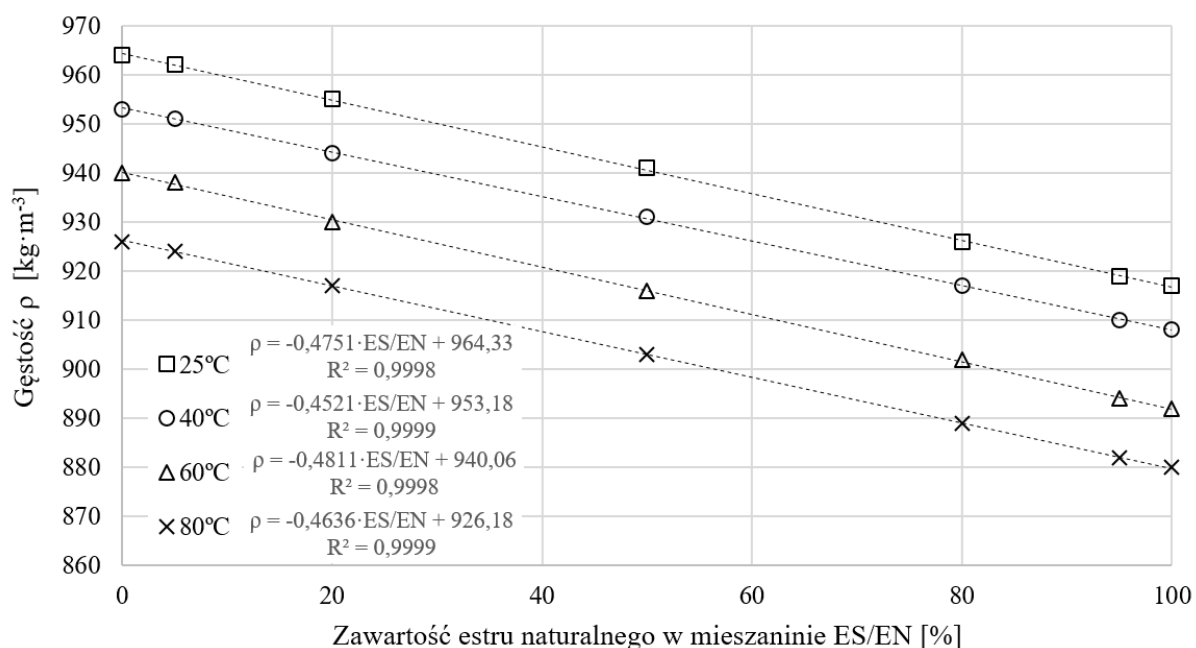
Wraz ze wzrostem temperatury zauważalny jest wzrost ciepła właściwego mieszaniny. Związane jest to ze wzrostem energii kinetycznej i potencjalnej oscylacji atomów cząsteczek estrów, dzięki czemu możliwa jest większa liczba stopni swobody. Energia kinetyczna jest tym większa, im większa jest szybkość poruszających się cząsteczek.

3.4. Gęstość ρ mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

W tabeli 4 i na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiaru gęstości ρ mieszaniny estrów syntetycznych i naturalnych. Wraz ze wzrostem zawartości estrów naturalnych, gęstość mieszaniny nieco zmalała. Gęstość ρ zmniejszyła się o 4,9% (dla 25°C), o 4,7% (dla 40°C), o 5,1% (dla 60°C) i o 5,0% (dla 80°C). Spadek gęstości był praktycznie niezależny od temperatury. Spadek gęstości ρ wywołany jest tym, że gęstość estrów naturalnych jest nieco mniejsza od gęstości estrów syntetycznych. Niewielkie różnice gęstości analizowanych cieczy wynikają z różnicy oddziaływań międzycząsteczkowych. Można zatem wywnioskować, że wraz ze wzrostem zawartości estrów naturalnych w mieszaninie, gęstość takiej mieszaniny będzie maleć, wpływając negatywnie na jej zdolność do transportu ciepła w transformatorze.

Tabela 4. Wyniki pomiarów gęstości ρ mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

Temperatura	Gęstość ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]						
	Proporcja estrów syntetycznych (ES) i estrów naturalnych (EN)						
	100% ES 0% EN	95% ES 5% EN	80% ES 20% EN	50% ES 50% EN	20% ES 80% EN	5% ES 95% EN	0% ES 100% EN
25°C	964	962	955	941	926	919	917
40°C	953	951	944	931	917	910	908
60°C	940	938	930	916	902	894	892
80°C	926	924	917	903	889	882	880



Rys. 4. Gęstość ρ mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

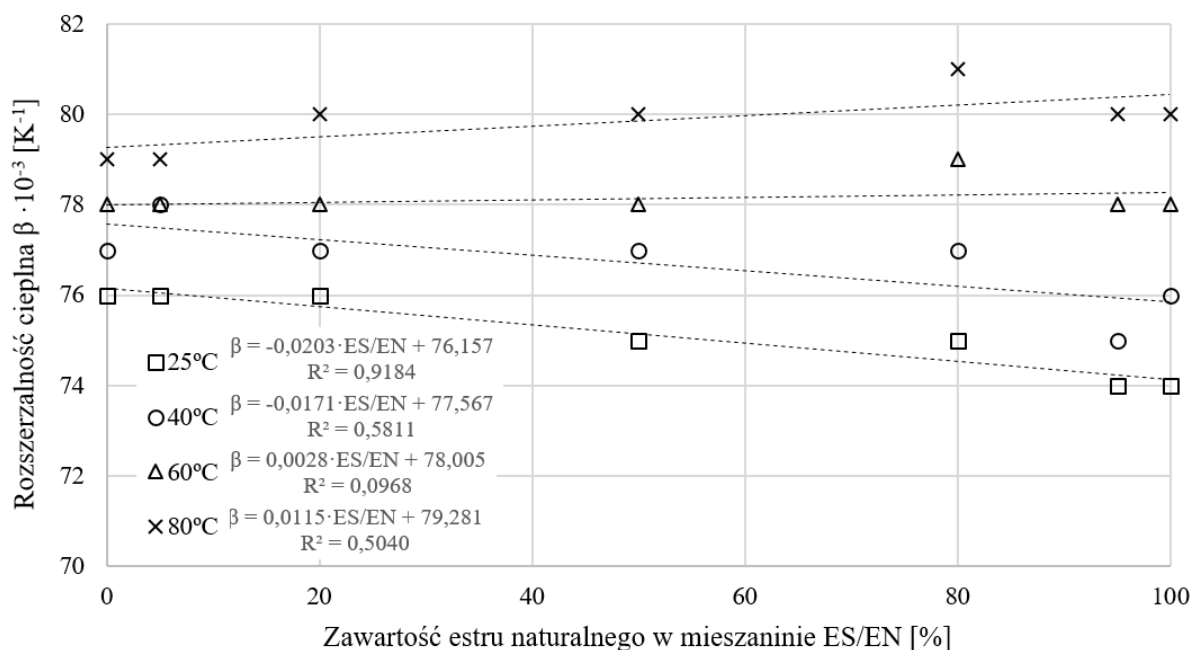
Gęstość mieszaniny maleje wraz ze wzrostem temperatury, ponieważ cząsteczki cieczy poruszają się z większą prędkością. Większa prędkość cząsteczek przekłada się na zmniejszenie sił międzycząsteczkowych, co w konsekwencji powoduje zwiększanie odległości między nimi. Zwiększanie odległości pomiędzy cząsteczkami powoduje wzrost objętość cieczy, co przekłada się na spadek jej gęstości.

3.5. Rozszerzalność cieplna β mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

W tabeli 5 i na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiaru rozszerzalności cieplnej β mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych. Jak pokazano, wzrost zawartości estrów naturalnych spowodował minimalne zmiany rozszerzalności cieplnej mieszaniny. Rozszerzalność β zmalała o 2,6% (dla 25°C) i o 1,3% (dla 40°C), nie zmieniła swojej wartości dla 60°C oraz wzrosła o 1,3% (dla 80°C). Nieznaczne zmiany rozszerzalności cieplnej analizowanych cieczy, podobnie jak w przypadku gęstości, wynikają z różnicy oddziaływań międzycząsteczkowych. Oznacza to, że wraz ze wzrostem estrów naturalnych w mieszaninie, rozszerzalność cieplna takiej mieszaniny zmienia się nieznacznie. Zmiana ta nie powinna wpłynąć znacząco na zdolność mieszaniny do transportu ciepła w transformatorze.

Tabela 5. Wyniki pomiarów rozszerzalności cieplnej β mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

Rozszerzalność cieplna β [K ⁻¹]							
Temperatura	Proporcja estrów syntetycznych (ES) i estrów naturalnych (EN)						
	100% ES 0% EN	95% ES 5% EN	80% ES 20% EN	50% ES 50% EN	20% ES 80% EN	5% ES 95% EN	0% ES 100% EN
25°C	0,00076	0,00076	0,00076	0,00075	0,00075	0,00074	0,00074
40°C	0,00077	0,00078	0,00077	0,00077	0,00077	0,00075	0,00076
60°C	0,00078	0,00078	0,00078	0,00078	0,00079	0,00078	0,00078
80°C	0,00079	0,00079	0,00080	0,00080	0,00081	0,00080	0,00080



Rys. 5. Rozszerzalność cieplna β mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

Wraz ze wzrostem temperatury zauważalny jest wzrost rozszerzalności cieplnej mieszaniny. Wzrost ten wynika z faktu, że cząsteczki cieczy drgają z coraz większą częstotliwością, co przekłada się na wzrost ich prędkości. W wyniku wzrostu prędkości cząsteczki cieczy zaczynają oddalać się od siebie, przez co zwiększeniu ulegają jej wymiary przestrzenne.

3.6. Współczynnik przejmowania ciepła α mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

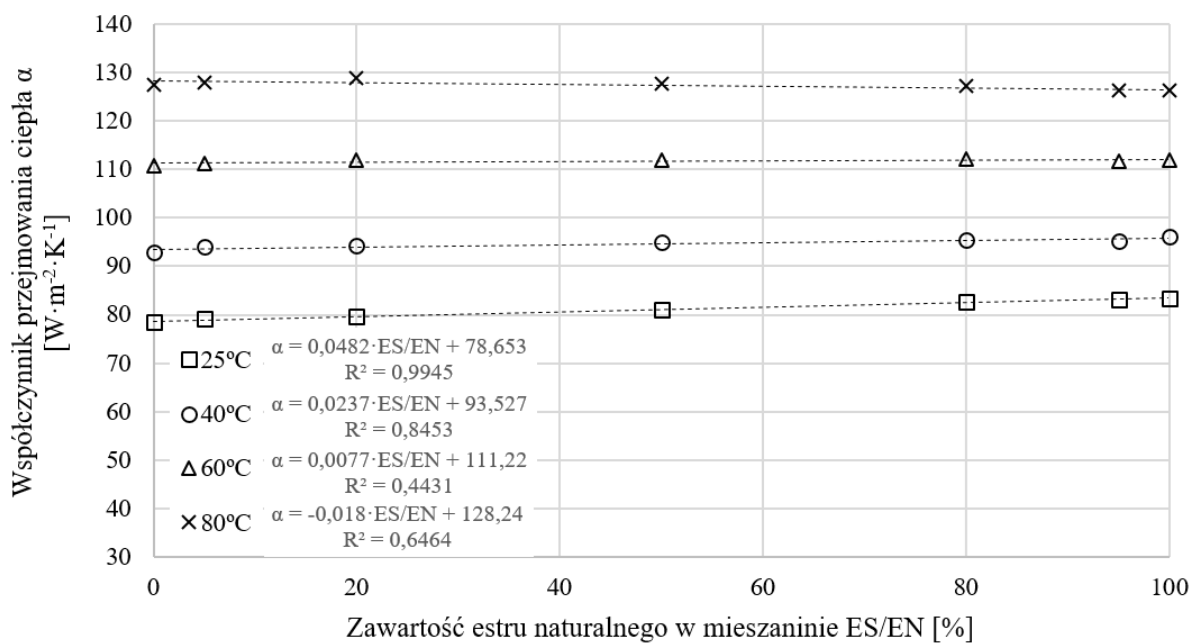
W tabeli 6 i na rysunku 6 przedstawiono wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych. Obliczenia przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów właściwości cieplnych, opisanych w podrozdziałach 3.1-3.5.

Tabela 6. Wyniki obliczeń współczynnika przejmowania ciepła α mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

Współczynnik przejmowania ciepła α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]							
Temperatura	Proporcja estrów syntetycznych (ES) i estrów naturalnych (EN)						
	100% ES 0% EN	95% ES 5% EN	80% ES 20% EN	50% ES 50% EN	20% ES 80% EN	5% ES 95% EN	0% ES 100% EN
25°C	78,43	79,17	79,60	80,98	82,58	83,21	83,46
40°C	92,85	93,97	94,27	95,04	95,50	95,22	96,12
60°C	110,72	111,18	111,81	112,00	112,09	111,64	111,80
80°C	127,51	127,88	128,83	127,70	127,10	126,19	126,17

Wzrost zawartości estrów naturalnych w mieszaninie ES/EN wywołał w zasadzie wzrost współczynnika α . Przyczyną tego było zwiększenie przewodności cieplnej oraz ciepła właściwego w skutek dodania estrów naturalnych, mimo wzrostu lepkości oraz zmniejszenia gęstości i rozszerzalności cieplnej. Zauważono również, że przyrosty współczynnika α

zmniejszały się wraz ze wzrostem temperatury. Przyczyną tego był znaczący wzrost lepkości na skutek dodania estrów naturalnych dla coraz wyższych wartości temperatury, podczas gdy zmiany pozostałych właściwości cieplnych utrzymywały się na stałym poziomie. Uzyskane wyniki były do przewidzenia, ponieważ współczynnik przejmowania ciepła estrów naturalnych był większy od współczynnika α estrów syntetycznych w temperaturze z zakresu 25÷60°C. W 80°C współczynnik α estrów naturalnych był już nieco mniejszy niż estrów syntetycznych.



Rys. 6. Współczynnik przejmowania ciepła α mieszaniny estrów syntetycznych i estrów naturalnych

Analiza rysunku 6 nie wykazuje wyraźnego maksimum współczynnika α . Oznacza to, że trudno podać optymalne proporcje obu rodzajów estrów. Jedyne wnioski, jakie się nasuwają, to stwierdzenie, że w przypadku temperatury do 60°C korzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia układu chłodzenia transformatora jest zastosowanie estrów naturalnych. W temperaturze 80°C współczynniki α obu rodzajów estrów są już porównywalne.

4. Wnioski

Wzrost zawartości estrów naturalnych w mieszaninie ES/EN spowodował zmiany wielu właściwości cieplnych. Przewodność cieplna wzrosła o kilkanaście procent. Ciepło właściwe i gęstość wzrosły o kilka procent. Lepkość wzrosła zależnie od temperatury o kilka – kilkadziesiąt procent. Rozszerzalność cieplna praktycznie nie zmieniła swojej wartości. Skutkiem takich zmian był wzrost współczynnika przejmowania ciepła α zależnie od temperatury o kilka – kilkanaście procent.

Mieszanina ES/EN nie posiada w zasadzie optymalnego składu, z punktu widzenia wartości współczynnika przejmowania ciepła α . Co prawda, dla 60°C i 80°C występują pewne maksima, lecz ich wartości są tylko o niespełna 1% większe od wartości współczynnika α dla 100% estru syntetycznego (mieszanina 100/0) czy też 100% estru naturalnego (mieszanina 0/100). W takiej sytuacji można stwierdzić, że z praktycznego punktu widzenia nie ma uzasadnienia stosowania mieszaniny ES/EN.

Literatura

1. ASTM D 1903-96. Standard test method for coefficient of thermal expansion of electrical insulating liquids of petroleum origin, and askarels.
2. Bertrand Y, Hoang L.C. Vegetable oils as substitute for mineral oils. Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials 2003: 491-494.
3. Cigre Brochure 436. Experiences in service with new insulating liquids. 2010.
4. Dombek G, Nadolny Z. Liquid kind, temperature, moisture, and ageing as an operating parameters conditioning reliability of transformer cooling system. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2016; 18(3): 413-417.
5. Dua R, Bhandari N, Kumar V. Multi-criteria optimization for obtaining efficiently blended transformer oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 2008; 15(3): 879-887.
6. Fofana I, Wasserberg V, Borsi H, Gockenbach E. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers, part 1: Investigation of mixed liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2002; 18(3): 18-31.
7. Fofana I, Wasserberg V, Borsi H, Gockenbach E. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers, part 2: Investigation of mixed liquid impregnated paper insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2002; 18(4): 5-16.
8. Fofana I, Wasserberg V, Borsi H, Gockenbach E. Retrofilling conditions of high-voltage transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2001; 17(2): 17-30.
9. ISO 649-1:1981. Laboratory glassware – Density hydrometers for general purposes – Part 1: Specification.
10. Liao R, Hao J, Yang L, Grzybowski S. Study on aging characteristics of mineral oil/natural ester mixtures – paper insulation. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)* 2011: 1-4.
11. Liao R, Hao J, Yang L, Liang S, Yin J. Improvement on the anti-aging properties of power transformers by using mixed insulating oil. *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)* 2010: 588-591.
12. Longva K. Natural ester distribution transformers; improved reliability and environmental safety. *Nordic Insulation Symposium* 2005: 293-295.
13. Lopatkiewicz R, Nadolny Z. Temperature field on high voltage power transformer. *Przegląd Elektrotechniczny* 2008; 84(10): 50-52.
14. Lopatkiewicz R, Nadolny Z, Przybyłek P. Influence of water content in paper on its thermal conductivity. *Przegląd Elektrotechniczny* 2010; 86(11B): 55-58.

15. Lopatkiewicz R, Nadolny Z, Przybyłek P. The influence of water content on thermal conductivity of paper used as transformer windings insulation. 10th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM) 2012: 1-4.
16. Lopatkiewicz R, Nadolny Z, Przybyłek P, Sikorski W. The influence of chosen parameters on thermal conductivity of windings insulation describing temperature distribution in transformer. *Przegląd Elektrotechniczny* 2012; 88(11B): 126-129.
17. McShane C.P. Relative properties of the new combustion resistant vegetable oil based dielectric coolants for distribution and power transformers. IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference 2001: 31-40.
18. McShane C.P, Luksich J, Rapp K.J. Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension. IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference 2003: 141-147.
19. Nadolny Z, Dombek G, Przybyłek P. Thermal properties of a mixture of mineral oil and synthetic ester in terms of its application in the transformer. IEEE Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) 2016: 857-860.
20. Nadolny Z, Dombek G, Przybyłek P, Prządka D. Thermal properties of mineral oil admixed with C₆₀ and TiO₂ nanoparticles. IEEE Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) 2016: 538-541.
21. Oommen T.V. Vegetable oils for liquid – filed transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2002; 18, 6-11.
22. Perrier C, Beroual A, Bessede J.L. Experimental investigations on different insulating liquids and mixtures for power transformers. IEEE International Symposium on Electrical Insulation 2004: 237-240.
23. Perrier C, Beroual A, Bessede J.L. Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 2006; 13: 556-564.
24. PN-EN ISO 3104. Przetwory naftowe – Ciecze przezroczyste i nieprzezroczyste – Oznaczanie lepkości kinematycznej i obliczanie lepkości dynamicznej.
25. PN-EN ISO 3675. Ropa naftowa i ciekłe przetwory naftowe – Laboratoryjne oznaczanie gęstości – Metoda z areometrem.
26. Rouse T.O. Mineral oil in transformer. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 1998; 14: 6-16.
27. Suwarno, Darma I.S. Dielectric properties of mixtures between mineral oil and natural ester. International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM) 2008: 514-517.

28. Suwarno, Marbun J. Effect of thermal aging on the dielectric properties of mixture between mineral oil and natural ester. IEEE Region 10 Conference TENCON 2015: 1-5.
29. Toudja T, Chetibi F, Beldjilali A, Moulai H, Beroual A. Electrical and physicochemical properties of mineral and vegetable oils mixtures. IEEE International Conference on Liquid Dielectrics (ICDL) 2014: 1-4.
30. Trnka P, Mentlik V, Cerny J. Electroinsulating fluids – new insulating mixtures. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) 2011: 575-578.
31. Trnka P, Mentlik V, Svoboda M. Ecologically acceptable insulating liquids for electrical appliances. IEEE 18th International Conference on Liquid Dielectric (ICDL) 2014: 1-4.
32. Wotzka D, Zmarzly D, Boczar T. Numerical simulation of acoustic wave propagating in a spherical object filled with insulating oil. Acta Physica Polonica A 2010; 118(6): 1272-1275.