

1. Hubert MORAÑDA⁽¹⁾, 2. Piotr PRZYBYŁEK⁽¹⁾, 3. Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK⁽¹⁾,
4. Krzysztof WALCZAK⁽¹⁾, 5. Jarosław GIELNIAK⁽¹⁾, 6. Wojciech SIKORSKI⁽¹⁾, 7. Krzysztof SIODŁA⁽¹⁾,
8. Ivo PINKIEWICZ⁽¹⁾, 9. Mateusz CYBULSKI⁽¹⁾, 10. Bartosz ORWAT⁽²⁾⁽³⁾, 11. Jakub SZYLING⁽²⁾,
12. Michał DUTKIEWICZ⁽²⁾, 13. Ireneusz KOWNACKI⁽²⁾, 14. Jędrzej WALKOWIAK⁽²⁾,
15. Adrian FRANCZYK⁽²⁾, 16. Bogdan MARCINIEC⁽²⁾,

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki (1), Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Centrum Zaawansowanych Technologii (2), Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Molekularnej (3)

ORCID. 1. 0000-0001-7961-5814, 2. 0000-0002-5258-5894, 3. 0000-0002-0903-9417, 4. 0000-0002-0722-9495, 5. 0000-0001-6885-1416, 6. 0000-0002-8067-3808, 7. 0000-0001-9393-7481, 8. 0000-0002-8456-5580, 9. 0000-0001-8316-8842, 10. 0000-0003-1210-0095, 11. 0000-0001-9680-5679, 12. 0000-0003-1437-4030, 13. 0000-0002-5445-760X, 14. 0000-0003-3683-8836, 15. 0000-0002-2717-5869, 16. 0000-0001-5203-1376

doi:10.15199/48.2021.12.46

Podsumowanie badań laboratoryjnych dotyczących suszenia izolacji celulozowej transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem estru syntetycznego oraz metod uzdatniania tego estru

Streszczenie. W artykule przedstawiono kompleksowo wyniki badań modelowych dotyczących suszenia izolacji celulozowej transformatorów rozdzielczych za pomocą medium ciekłego, którym jest ester syntetyczny. Badania prowadzone na modelach laboratoryjnych wykazały, że efektywność suszenia zależy, między innymi, od zawilgocenia wyjściowego celulozy, grubości wyrobów celulozowych, temperatury i zawilgocenia estru. W artykule przedstawiono także trzy technologie uzdatniania estru roboczego zanieczyszczonego olejem mineralnym.

Abstract. The article comprehensively presents the results of research on distribution transformers cellulose insulation models drying with the use of a liquid medium, which is synthetic ester. The tests carried out on laboratory models have shown that the drying efficiency depends, among others, on the initial moisture of the cellulose, the thickness of the cellulose products, the temperature and the moisture of the ester. The article also presents three technologies of working ester treatment contaminated by mineral oil (**Summary of laboratory tests on drying of cellulose insulation of distribution transformers with the use of synthetic ester and methods of treatment of the ester**).

Słowa kluczowe: ester syntetyczny, zawilgocenie izolacji celulozowej, suszenie izolacji celulozowej, transformatory rozdzielcze.

Keywords: synthetic ester, moisture of cellulose insulation, drying of cellulose insulation, distribution transformers.

Wprowadzenie

Konsorcjum złożone z dwóch jednostek naukowych – zespołu z Politechniki Poznańskiej oraz Centrum Zaawansowanych Technologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu oraz firmy Ad Moto Rafał Zawisz realizowało innowacyjny projekt dotyczący suszenia izolacji celulozowej transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem estru syntetycznego.

Jednym z najważniejszych problemów eksploatacyjnych transformatorów jest zawilgocenie izolacji postępujące wraz z upływem czasu. Za najważniejsze przyczyny zawilgocenia uważa się nieszczelność kadzi oraz proces rozkładu chemicznego celulozy, któremu towarzyszy wydzielanie wody. Im wyższa temperatura eksploatacji transformatora, tym intensywniejsze jest wydzielanie wody. Stwierdzono też, że wydzielająca się woda działa przyspieszająco na procesy degradacji chemicznej celulozy, co sprawia, że roczny przyrost zawilgocenia izolacji celulozowej rośnie wraz z upływem lat eksploatacji jednostki [1, 2].

Znaczne zawilgocenie izolacji celulozowej może być przyczyną wysokoenergetycznych wyładowań niezupełnych (wnz) [3]. Najgroźniejszym jednak skutkiem zawilgocenia izolacji celulozowej jest zjawisko, nazywane z angielska *bubble effect* [4].

Bubble effect polega na gwałtownym uwalnianiu wody zaadsorbowanej na powierzchni włókien celulozowych po osiągnięciu krytycznej temperatury. To prowadzi do wzrostu ciśnienia w kadzi, eksplozji i pożaru jednostki. Według statystyk, prowadzonych przez instytucje ubezpieczające transformatory, rocznie dochodzi na Świecie do setek eksplozji i pożarów transformatorów.

Izolacja transformatorów nowych, dobrze wysuszonych, zawiera 0,6-0,8% wody [5]. W miarę upływu lat eksploatacji

zawilgocenie izolacji rośnie. Według naszych badań, prowadzonych w ramach projektu międzynarodowego [6, 7], izolacja celulozowa transformatorów sieciowych po 35 latach eksploatacji osiąga poziom zawilgocenia 2,0%, natomiast transformatory rozdzielcze, które z zasady są obciążane mocą większą w stosunku do mocy znamionowej niż transformatory sieciowe, po 35 latach eksploatacji wykazują zawilgocenie 2,5-3,0%. Zgodnie z klasyfikacją IEEE [8], izolację o zawilgoceniu powyżej 2,0% traktuje się jako „mokrą”.

Według fundamentalnej pracy Oommena, dotyczącej zjawiska *bubble effect* w transformatorach [9], przy zawilgoceniu izolacji 3,0% można się spodziewać zjawiska *bubble effect* przy temperaturze 130°C. Należy w tym miejscu podkreślić, że zarówno obowiązująca Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów [10] jak i najnowsza norma IEC [11] dopuszczają obciążenie transformatora prądem większym od znamionowego – normalne obciążenie cykliczne $I=1,5I_n$, długotrwałe obciążenie awaryjne $I=1,8I_n$, przy których temperatura w *hot-spot* (najgorętszym miejscu uzwojenia) może osiągać 140°C. Widać więc, że w przypadku poprawnej eksploatacji starszej jednostki może wystąpić bardzo groźny *bubble effect* wyłączający transformator w czasie zwiększonego poboru mocy, pozbawiając odbiorców zasilania.

Wysoki poziom zawilgocenia izolacji stałej transformatora powoduje szereg zagrożeń i ograniczeń w eksploatacji, dlatego konieczne jest suszenie izolacji celulozowej.

Metody suszenia izolacji celulozowej dostępne obecnie na rynku

Suszenie izolacji transformatorów w fabryce prowadzi się w suszarni stacjonarnej, natomiast transformatory w

eksploatacji są suszone z wykorzystaniem systemów mobilnych.

Metody stosowane dotychczas wymagają nagrzania izolacji za pomocą gorącego oleju, gorącego powietrza lub specjalnego solwentu oraz wytworzenia próżni. Obecnie najczęściej jest stosowana metoda LFH (*Low Frequency Heating*) [12, 13]. Polega ona na nagrzaniu uzwojeń za pomocą prądu niskiej częstotliwości. Uzwojenie wysokiego napięcia jest zasilane napięciem o regulowanej częstotliwości, natomiast uzwojenie niskiego napięcia jest zwarte. Wymagane jest wytworzenie próżni rzędu 1 mbar. Metoda ta jest bardzo efektywna, ale droga.

W transformatorach rozdzielczych mała wytrzymałość kadzi na ściskanie nie pozwalała na wytworzenie odpowiedniej próżni. Dlatego, szczególnie w przypadku tych transformatorów, metody suszenia na miejscu zainstalowania, niewymagające próżni, są bardzo pożądane.

Suszenie izolacji celulozowej z wykorzystaniem estru syntetycznego

Ester syntetyczny jest dielektrykiem ciekłym alternatywnym w stosunku do oleju mineralnego. Jest niepalny, niewybuchowy, spowalnia procesy starzeniowe celulozy i jest bezpieczny ekologicznie [14]. Szczególna jego cecha polega na ogromnej rozpuszczalności wody. Na przykład, w temperaturze 20°C rozpuszczalność wody w estrze syntetycznym wynosi 1750 ppm, natomiast, dla porównania, w oleju mineralnym tylko 50 ppm [15]. Jedną cząsteczką estru wiąże, na zasadzie wiązań wodorowych, cztery cząsteczki wody, co tłumaczy wielką rozpuszczalność wody w estrze. Tę szczególną cechę wykorzystano w procedurze suszenia izolacji transformatorów.

Zakładamy, że suszenie będzie się odbywało w miejscu zainstalowania transformatora, a więc system suszący musi być mobilny. Procedura suszenia izolacji transformatora za pomocą estru wymaga spuszczenia oleju i wprowadzenia suchego estru. Aby poprawić efekt wysuszenia można wprowadzić dwukrotnie lub trzykrotnie suchy ester, ale jest to kłopotliwe, gdyż wymaga transportu dwóch lub trzech zbiorników z estrum. Najkorzystniejszy jest system z wymuszoną cyrkulacją estru nagrzewanego i suszonego w sposób ciągły w agregacie próżniowym.

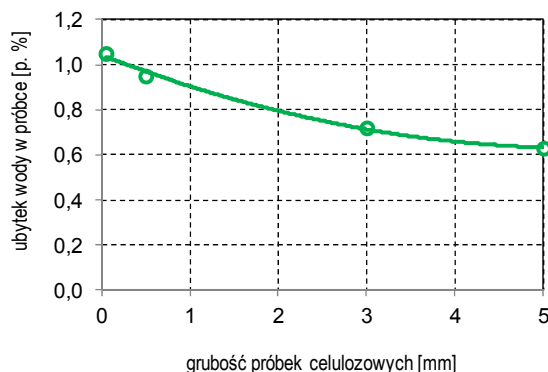
Oszacowanie efektywności suszenia i wyznaczenie optymalnych wartości wielkości, na które mamy wpływ w procesie suszenia, wymagało rozbudowanych badań laboratoryjnych.

Badania modelowe procesu suszenia izolacji celulozowej za pomocą estru

Proces suszenia izolacji celulozowej w estrze zależy od bardzo wielu czynników, między innymi od zawilgocenia wyjściowego celulozy, zawilgocenia estru, temperatury estru, grubości materiału celulozowego, stosunku masy wyrobów celulozowych do masy oleju w transformatorze.

Efektywność suszenia bardzo zależy od grubości próbek. Badano próbki papierowe o grubości 0,05 mm oraz próbki preszpanu o grubości 0,5; 3,0 i 5,0 mm. Papier nawinięto ciasno na rurkę miedzianą, co odpowiadało warunkom rzeczywistym. Z preszpanu o grubości 0,5 mm wykonano zwijki sześciowarstwowe, tworząc tuleje o grubości 3 mm. Natomiast próbki z preszpanu o grubości 3,0 i 5,0 mm miały kształt prostokąta. Próbki preparowano w komorze klimatycznej o odpowiednio dobranej temperaturze i wilgotności powietrza. Zawilgocenie próbek wyznaczano wykorzystując metodę Karla Fischera. W tym eksperymencie suszono próbki wprowadzając do komory badawczej jednorazowo suchy ester. Mieszanie estru wymuszono za pomocą mieszadeł magnetycznych.

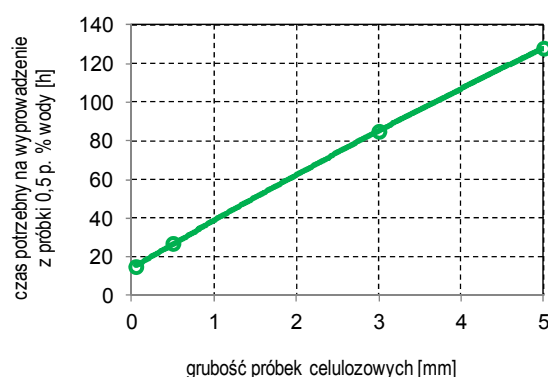
Na rysunku 1 przedstawiono ubytek wody w próbkach celulozowych w zależności od ich grubości. Zawilgocenie wyjściowe próbek wynosiło ok. 3%. Ester o zawilgoceniu 70 ppm miał temperaturę 70°C. Proces suszenia trwał 168 h (7 dób). Na rysunku wyraźnie widać malejący efekt suszenia wraz ze wzrostem grubości próbek.



Rys.1. Ubytek wody w próbkach celulozowych w procesie suszenia estrum syntetycznym w zależności od ich grubości; zawilgocenie początkowe próbek ok. 3%, temperatura estru 70°C, zawilgocenie estru 70 ppm, czas suszenia 168 h; w oparciu o [16]

Rysunek 2 dobrze obrazuje dynamikę suszenia materiałów celulozowych w zależności od ich grubości. Przykładowo, wyprowadzenie 0,5 p.% wody z próbki preszpanu o grubości 0,5 mm wymaga około 25 h suszenia, natomiast z próbki o grubości 5,0 mm – aż około 130 h.

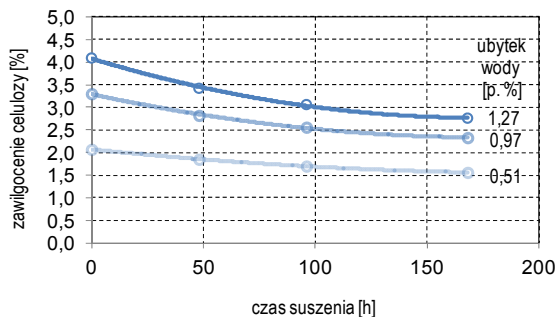
Efekt wysuszenia próbek zależy od ich zawilgocenia wyjściowego. Na rysunku 3 przedstawiono zawartość wody w próbkach w zależności od czasu suszenia dla trzech różnych wartości ich zawilgocenia wyjściowego. Do eksperymentu wybrano próbki preszpanowe o grubości 3 mm, o zawilgoceniu wyjściowym 2,07; 3,30 i 4,09%. W tym przypadku do komory badawczej trzykrotnie wprowadzono suchy ester o zawilgoceniu 70 ppm, co w pewnym przybliżeniu odpowiada ciąglemu suszeniu estru. Pierwszą porcję estru wprowadzono na początku eksperymentu i utrzymywano przez dwie doby, drugą utrzymywano przez kolejne dwie doby, a trzecią przez trzy doby. Łączny czas suszenia wynosił 168 h.



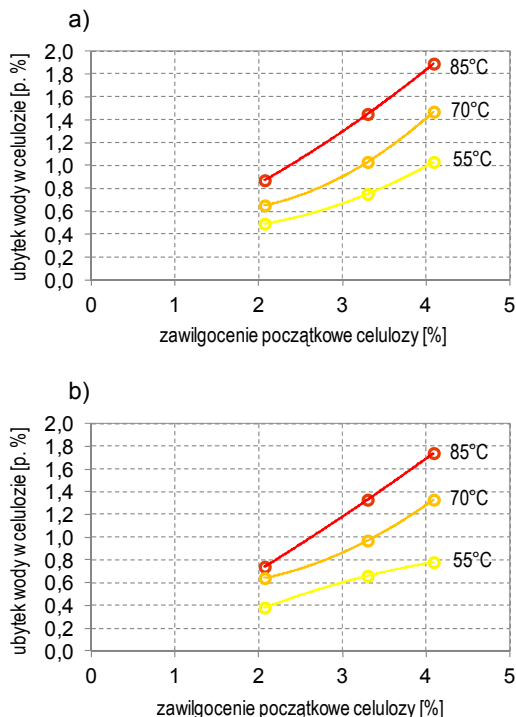
Rys.2. Czas potrzebny na wyprowadzenie 0,5 p.% wody z próbek w zależności od jej grubości; zawilgocenie początkowe próbek ok. 3%, temperatura suszenia 70°C, zawilgocenie estru 70 ppm, czas suszenia 168 h; w oparciu o [16]

Widać, że w identycznych warunkach suszenia ubytek wody jest dużo większy w próbkach o większym zawilgoceniu wyjściowym. Z próbki o zawilgoceniu wyjściowym 4,09%, po 168 h wyprowadzono 1,27 p.% wody, natomiast z próbki o wyjściowym zawilgoceniu 2,07% tylko 0,51 p.%.

Oczywisty jest wpływ temperatury na efektywność suszenia wyrobów celulozowych. W eksperymencie przyjęto trzy wartości temperatury: 55, 70 i 85°C. Temperatura 85°C jest najwyższą, jaką może zapewnić agregat próżniowy do uzdatniania oleju wykorzystywany przez konsorcjanta przemysłowego. Na rysunku 4 przedstawiono ubytek wody w próbkach w zależności od zawilgocenia wyjściowego celulozy dla trzech wartości temperatury suszenia. Ester o zawilgoceniu wyjściowym 70 ppm wprowadzono trzykrotnie do komory w ciągu 168 h. Stosunek masy celulozy do masy estru wynosił 1:30 oraz 1:15. Z rysunku 4 wynika, że zwiększenie temperatury z 55 do 85°C powoduje około dwukrotny wzrost ilości wody wyprowadzonej z celulozy w procesie suszenia.



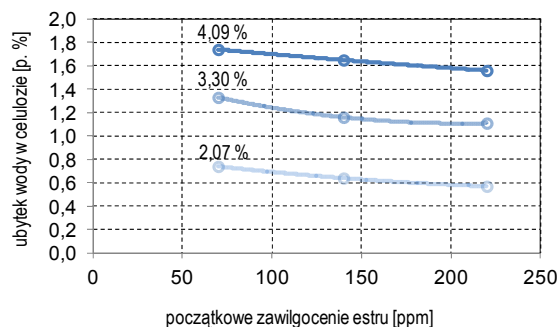
Rys.3. Zawartość wody w próbkach celulozowych w zależności od czasu suszenia dla trzech różnych wartości zawilgocenia początkowego celulozy (2,07; 3,30; 4,09%); grubość próbek 3 mm, trzykrotnie wprowadzono ester o zawilgoceniu 70 ppm i temperaturze 70°C, łączny czas suszenia 168 h, stosunek masy celulozy do masy estru 1:15; w oparciu o [16]



Rys.4. Ubytek wody w próbkach w zależności od zawilgocenia wyjściowego celulozy przy różnych wartościach temperatury; grubość próbek 3 mm, ester o zawilgoceniu 70 ppm wprowadzono trzykrotnie w czasie 168 h, stosunek masy celulozy do masy estru 1:30 (a) oraz 1:15 (b); w oparciu o [16]

Wilgotność wyjściowa estru ma mniejszy wpływ na efektywność suszenia, niż można się było spodziewać. W eksperymencie wybrano trzy wartości wyjściowego

zawilgocenia estru, równe 70, 140 i 220 ppm. Ester o każdej wartości zawilgocenia wprowadzono trzykrotnie do komory w ciągu 168 h. Na rysunku 5 przedstawiono ubytek wody w próbkach o wyjściowym zawilgoceniu celulozy 2,07; 3,30 i 4,09%. Grubość próbek preszpanowych wynosiła 3 mm, temperatura estru równa była 85°C. Przykładowo, susząc próbki o wyjściowym zawilgoceniu 4,09% estrem o zawilgoceniu 70 ppm, można wyprowadzić z próbki 1,74 p.% wody, a susząc estrem o zawilgoceniu 220 ppm ilość wyprowadzonej wody wynosi 1,56 p.%. Jest to wartość mniejsza tylko o ok. 10%. Stosunkowo mały wpływ zawilgocenia estru na efekt wysuszenia tłumaczy się tym, że zawilgocenie estru w stanie równowagi, przy zawilgoceniu celulozy 3-4%, wynosi ponad 1200 ppm przy temperaturze 70-80°C [17]. Dopiero w stanie równowagi ustaje proces suszenia. A więc widać, że nawet największe przyjęte zawilgocenie estru, równe 220 ppm, jest jeszcze bardzo odległe od zawilgocenia w stanie równowagi. Jest to dobra informacja w aspekcie wdrażania wyników badań.



Rys.5. Ubytek wody w celulozie w punktach procentowych w zależności od wyjściowego zawilgocenia estru trzykrotnie wprowadzonego; trzy wartości początkowego zawilgocenia celulozy (2,07; 3,30; 4,09%), grubość izolacji 3 mm, stosunek masy celulozy do masy estru 1:15, czas suszenia 168 h, temperatura 85°C; w oparciu o [16]

Założono w projekcie, że docelowo suszenie będzie realizowane w systemie z estrem cyrkulującym w kadzi transformatora, grzanym i suszonym na zewnątrz. Tę sytuację zamodelowano w warunkach laboratoryjnych. Model suszenia obiegowego izolacji celulozowej musi zapewniać cyrkulację estru oraz jego grzanie i suszenie. Na rysunku 6 przedstawiono schemat modelu laboratoryjnego. Obiekt badań umieszczono w komorze izolowanej termicznie. Na wejściu do komory zamontowano pompę o regulowanej szybkości przepływu. Na wyjściu zainstalowano przepływomierz z zaworem regulującym przepływ estru.

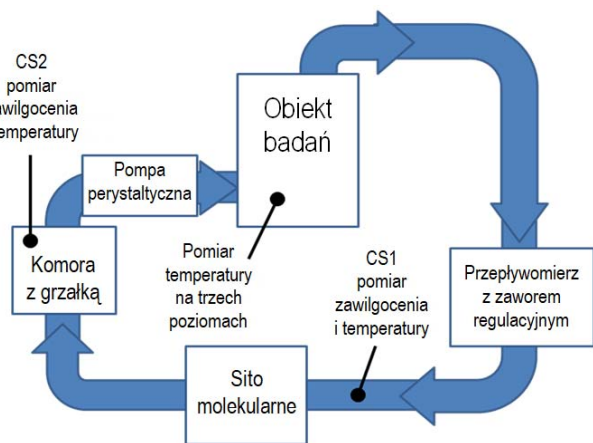
W warunkach rzeczywistych suszenie estru będzie realizowane z wykorzystaniem agregatu próżniowego, natomiast w modelu laboratoryjnym zastosowano sito molekularne. Masę adsorbentów w sicie tak dobrano, aby zawilgocenie estru tłoczonego do komory z obiektem badań nie przekraczało 130 ppm. Na wejściu do sita molekularnego zamontowano sondę pojemnościową CS1 służącą do pomiaru temperatury i zawilgocenia estru.

Ester po wyjściu z sita molekularnego jest kierowany do komory z grzałką o regulowanej mocy. Grzałka zapewnia temperaturę estru do 85°C, co odpowiada możliwościom agregatów próżniowych. W komorze z grzałką zamontowano sondę pojemnościową CS2 mierzącą parametry estru tłoczonego do komory z obiektem badań.

Komorę badawczą wykonano z mieszczą sprężystego. Mieszek kompensuje zmiany ciśnienia w komorze powodowane zmianami temperatury. Na zewnętrznej ścianie komory mierzona jest temperatura w trzech

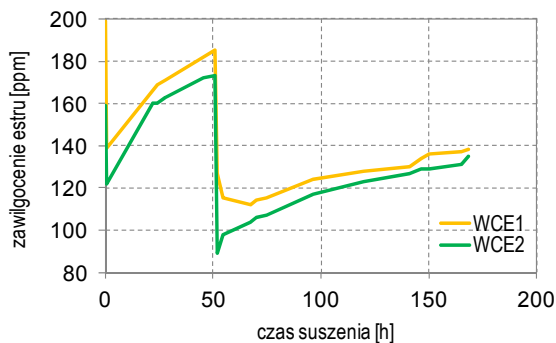
miejscach, za pomocą termopar. Temperatura estru w górnej warstwie w komorze jest mierzona za pomocą sondy odporowej.

Obiektem badanym jest model uzwojenia warstwowego transformatora. Uzwojenie wykonano z drutu miedzianego profilowanego izolowanego papierem. Między warstwami umieszczono przekładki wzdłużne z preszpanu, o grubości 2,2 mm, tworzące kanały olejowe. Z przekładek tych wycinano próbki do badań zawilgocenia celulozy po procesie suszenia.



Rys.6. Schemat laboratoryjnego modelu suszenia obiegowego izolacji celulozowej; w oparciu o [18]

Do suszenia wykorzystano ester o zawilgoceniu wyjściowym około 120 ppm. Na rysunku 7 przedstawiono zawilgocenie estru wchodzącego do sita molekularnego (WCE1) oraz wychodzącego z sita i przechodzącego przez komorę z grzałką (WCE2).



Rys.7. Zawilgocenie estru wchodzącego do sita molekularnego (WCE1) oraz wychodzącego (WCE2); w oparciu o [18]

Proces suszenia trwał 7 dób. Po dwóch pierwszych dobach wymieniono adsorber z sitem molekularnym. Po wymianie adsorbera zawilgocenie estru skokowo zmalało. Z upływem czasu suszenia zawilgocenie estru wchodzącego do sita i wychodzącego z niego nieco rosło, ale efektywność sita molekularnego była stała. Różnica zawilgocenia estru wchodzącego i wychodzącego z sita wynosiła stale około 10 ppm. Zawilgocenie estru wychodzącego z sita utrzymywało się na zadowalającym poziomie około 100-130 ppm. Temperatura w górnej warstwie estru utrzymywała się na poziomie 74-78°C.

Po upływie 168 h (7 dób) wyznaczono zawilgocenie próbek celulozowych pobranych z przekładki preszpanowej wzdłużnej. Próbkę pobrano z dolnej, środkowej oraz górnej części przekładki. Zawilgocenie wyjściowe próbek wynosiło około 2,3%. Ubytek wody w tych próbkach po suszeniu

wynosił, odpowiednio, 1,02; 1,15 i 1,07 p.%. Zawilgocenie wyznaczono korzystając z metody Karla Fischera.

Korzystając z krzywych równowagi zawilgocenia celulozy i estru [19] można stwierdzić, że utrzymywanie zawilgocenia estru na poziomie około 130 ppm powinno umożliwić wysuszenie preszpanu nawet do poziomu około 0,5%. Ale to wymagałoby znacznego wydłużenia czasu suszenia. Wyniki suszenia obiegowego uzyskane na modelu laboratoryjnym należy uznać za satysfakcjonujące.

Uzdatnianie estru syntetycznego

Ester MIDEL 7131, stanowiący medium suszące, ze względu na wysoką cenę, będzie wykorzystywany wielokrotnie podczas suszenia izolacji celulozowej transformatorów. W konsekwencji, każdorazowe użycie tego czynnika suszącego będzie prowadziło do jego stopniowego zanieczyszczenia olejem mineralnym, który nie całkowicie został usunięty z kadzi transformatora oraz z izolacji celulozowej. Ester po wielokrotnym użyciu może zawierać nawet kilkanaście procent oleju mineralnego [20]. W konsekwencji, znacznie obniża to jego właściwości sorpcyjne względem wody, a tym samym pogarsza efektywność procesu suszenia. Dlatego przewidziano procedurę uzdatniania estru.

Badania laboratoryjne na układach modelowych rozpoczęto od oceny efektywności prostej metody destylacji. Obiektami badań były mieszanki estru syntetycznego MIDEL 7131 oraz oleju mineralnego transformatorowego ORLEN OIL TRAF0 EN. Próbkę cieczy zawierały 20% oleju oraz 80% estru. Testy prowadzono na próbkach pięćdziesięciogramowych. Badano wpływ temperatury i obniżonego ciśnienia na efektywność procesu destylacji poprzez monitorowanie składu cieczy wyczerpanej oraz zebranego destylatu. W optymalnych warunkach, w wyniku oddestylowania składnika olejowego, zawartość oleju w próbce cieczy wyczerpanej wynosiła 2,6%, co z punktu widzenia ponownego użycia uzdatnionego estru w procedurze suszenia można uznać za wartość satysfakcjonującą. Jednakże, w przypadku tej metody obserwowano znaczącą stratę estru syntetycznego, wynoszącą 7-13%. W związku z powyższym, kontynuowano prace nad znalezieniem dogodnej, ewaporacyjnej metody usuwania domieszki olejowej z medium suszącego, cechującej się mniejszymi stratami estru. W tym celu przetestowano również możliwość wykorzystania próżniowej wyparki rotacyjnej. Niestety, wykonane testy wykazały, że nie spełnia ona przyjętych założeń zawartości oleju w cieczy wyczerpanej, gdyż po zakończeniu procesu uzdatniania zawartość składnika węglowodorowego w analizowanej próbce wynosiła znacznie powyżej 5%. Poprawę wyników można by uzyskać zwiększając temperaturę procesu do 300°C i obniżając ciśnienie, ale to stwarzałoby zagrożenie podczas prowadzenia procesu uzdatniania estru w skali przemysłowej.

Kolejne badania były ukierunkowane na ograniczenie strat estru w czasie procesu destylacji, przy czym, w tym miejscu należy wspomnieć, że badania chromatograficzne rozdzielanych substancji wykazały, że czasy retencji dla najcięższych frakcji oleju są jedynie nieznacznie krótsze od czasów retencji najlżejszych składników estru MIDEL7131. Wobec powyższego należy przyjąć, że podczas pierwszego procesu uzdatniania wraz z składnikami węglowodorowymi oddestylowane zostaną również najlżejsze frakcje estrowe. Niemniej jednak, w celu ograniczenia strat kosztownego medium suszącego, dalsze prace nad sposobem jego uzdatniania prowadzono z wykorzystaniem układu destylacyjnego wyposażonego w adiabatyczną kolumnę rektyfikacyjną Vigreux. W zestawie tym, podczas procesu

rektyfikacji, uzyskuje się gradient temperatury wzdłuż kolumny. Na szczycie kolumny temperatura jest dużo niższa niż w jej początkowej części. Wówczas możliwe jest oddestylowanie lotniejszych składników od tych posiadających wyższą temperaturę wrzenia – w tym przypadku składników oleju transformatorowego od estru syntetycznego. Optymalizację warunków procesu prowadzono w skali 500 g wyjściowej mieszanki. W rezultacie, dla optymalnych warunków, uzyskano bardzo dobre wyniki, mianowicie, pozostałość oleju w cieczy wyczerpanej (uzdatnionym estrze) wynosiła 1,28%, natomiast strata estru nie przekraczała 1,3%. Stwierdzono również, że rektyfikacja pozwala na znaczne zmniejszenie zawilgocenia estru.

Dalsze badania polegały na optymalizacji parametrów rektyfikacji przy zwiększeniu skali procesu uzdatniania do 5000 g materiału wsadowego, jak również możliwości wielokrotnej rektyfikacji jednej porcji estru, w celu optymalizacji rachunku ekonomicznego usługi suszenia izolacji transformatorów z użyciem dość kosztownego medium ciekłego. Uzyskane rezultaty pozwoliły na wyciągnięcie wniosków mówiących, że destylacja periodyczna z wykorzystaniem zestawu wyposażonego w kolumnę Vigreux może być stosowana w wielkotonażowym procesie przemysłowym, jak również, że eksploatowany ester może być uzdatniany wielokrotnie bez utraty jego właściwości sorpcyjnych względem wody.

Kolejne badania laboratoryjne dotyczyły metody ciągłej z użyciem wyparki warstewkowej z przegarnianiem. Przeprowadzono optymalizację podstawowych parametrów – temperatury, ciśnienia, szybkości wprowadzania mieszaniny, szybkości obrotów rotora. Uzyskane pozytywne wyniki pozwalają również tę metodę rekomendować do uzdatniania estru w skali przemysłowej.

Trzecią metodą, którą testowano podczas badań nad dogodnym ewaporacyjnym sposobem usuwania domieszki olejowej z estrowego medium suszącego była destylacja krótkiej ścieżki (ang. *Short Path Distillation*). Jest ona powszechnie stosowana w skali wielkotonażowej, np. podczas rozdzielania diglicerydów od triglicerydów kwasów tłuszczowych. Rezultaty z przeprowadzonych badań jednoznacznie potwierdziły możliwość użycia również tej metody dla badanego układu ciekłych składników, gdyż podczas destylacji możliwe było osiągnięcie małej pozostałości oleju w uzdatnionym estrze, przy nieznacznym jego stratach.

Podsumowując, na potrzeby uzdatniania estru syntetycznego w skali wielkotonażowej, przeprowadzone badania pozwoliły na zarekomendowanie trzech metod, mianowicie periodycznej destylacji z wykorzystaniem kolumny rektyfikacyjnej Vigreux oraz metod ciągłych, takich jak destylacja cienkowarstwowa z przegarnianiem oraz destylacja metodą krótkiej ścieżki.

Suszenie izolacji transformatora stanowi ingerencję w jego stan techniczny. Wymaga to przestrzegania odpowiednich instrukcji, które obejmują procedurę suszenia oraz czynności, które powinny być zrealizowane przed uruchomieniem transformatora, przy jego załączeniu, w ruchu próbnym oraz w trakcie dalszej eksploatacji po suszeniu. W związku z tym został przez nas opracowany dokument, pt. „Instrukcja eksploatacji transformatorów poddanych procedurze suszenia izolacji celulozowej z wykorzystaniem estru syntetycznego”. Może on stanowić aneks do powszechnie stosowanej w Polsce Ramowej Instrukcji Eksploatacji Transformatorów [10].

Artykuł współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Poddziałania 4.1.2 „Regionalne agendy naukowo-badawcze”, w ramach projektu POIR.04.01.02-00-0045/17 pt. „Mobilny system suszenia izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego”; całkowita wartość projektu 7 677 957 zł, w tym dofinansowanie z NCBR 6 084 569 zł.



Autorzy: dr hab. inż. Hubert Morańda, profesor uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl; dr hab. inż. Piotr Przybyłek, profesor uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl; prof. dr hab. inż. Hanna Mościcka-Grzesiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: hanna.moscicka-grzesiak@put.poznan.pl; dr hab. inż. Krzysztof Walczak, profesor uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: krzysztof.walczak@put.poznan.pl; dr hab. inż. Piotr Przybyłek, profesor uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: piotr.przybylek@put.poznan.pl; dr hab. inż. Jarosław Gielniak, profesor uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl; dr inż. Wojciech Sikorski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: wojciech.sikorski@put.poznan.pl; dr hab. inż. Krzysztof Siodła, profesor uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: krzysztof.siodla@put.poznan.pl; dr inż. Ivo Pinkiewicz, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: ivo.pinkiewicz@put.poznan.pl; mgr inż. Mateusz Cybulski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 61-138 Poznań, E-mail: mateusz.cybulski@doctorate.put.poznan.pl; dr Bartosz Orwat, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Centrum Zaawansowanych Technologii UAM, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 10, 61-614 Poznań, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Molekularnej, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, E-mail: bartosz.orwat@gmail.com; dr Jakub Szyling, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Centrum Zaawansowanych Technologii UAM, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 10, 61-614 Poznań, E-mail: j.szyling@amu.edu.pl; dr Michał Dutkiewicz, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Centrum Zaawansowanych Technologii UAM, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 10, 61-614 Poznań, E-mail: midu@amu.edu.pl; dr hab. Ireneusz Kownacki, profesor uczelni, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Centrum Zaawansowanych Technologii UAM, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 10, 61-614 Poznań, E-mail: ireneusz.kownacki@amu.edu.pl; dr hab. inż. Jędrzej Walkowiak, profesor uczelni, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Centrum Zaawansowanych Technologii UAM, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 10, 61-614 Poznań, E-mail: jedrzejw@amu.edu.pl; dr Adrian Franczyk, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Centrum Zaawansowanych Technologii UAM, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 10, 61-614 Poznań, E-mail: adrianf@amu.edu.pl; prof. dr hab. Bogdan Marciniec, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Centrum Zaawansowanych Technologii UAM, ul. Uniwersytetu Poznańskiego 10, 61-614 Poznań, E-mail: marcinb@amu.edu.pl

LITERATURA

- [1] CIGRE Brochure 323, WG TF D1.01.10, Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers, 2007
- [2] Lawson W.G., Simmons M.A., Gale P.S., Thermal ageing of cellulose paper insulation, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1 (1977), E1-12
- [3] Sikorski W., Walczak K., Morańda H., Gil W., Andrzejewski M., System monitoringu wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej – doświadczenia eksploatacyjne, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 11b/2012, 117-121
- [4] Przybyłek P., Badania temperatury inicjacji efektu bąbelkowania w izolacji papier-olej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr.11b/2010, 166-169

- [5] Fofana I., Vasserberg V., Borsi H., Gockenbach E., Drying of transformers using zeolite, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 9, n.1, 2002, s. 97-103
- [6] REDIATool Reliable diagnostics of HV transformer insulation for safety assurances of power transmission system, koordynator: Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, członkowie konsorcjum: Chalmers University of Technology, Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Zachód, RWE Net Aktiengesellschaft, Universitaet Stuttgart, Zakłady Produkcyjno-Remontowe Energetyki Poznań “Energetyka Czerwonak”, okres realizacji projektu 2003-2006
- [7] Gielniak J., Graczkowski A., Moranda H., Przybyłek P., Walczak K., Nadolny Z., Mościcka-Grzesiak H., Feser K., Gubanski S.M., Moisture in cellulose insulation of power transformers-statistics, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20 (2013), n. 3, 982-987
- [8] IEEE Std. 62-1995, Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus, Part I: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors, New York, USA, 16.03.1995
- [9] Oommen T.V., Lindgren S.R., Bubble evolution from transformer overload, in materials *IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. Exposition*, 1, 2001, pp. 137-142
- [10] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, ENERGOPOMIAR-ELEKTRYKA, Gliwice, 2012
- [11] IEC 60076-7: 2018, Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers
- [12] Bosigner J., The Use of Low Frequency Heating Techniques in the Insulation Drying Process for Liquid Filled Small Power Transformers, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES, Vol. 2, pp. 688-692
- [13] Koestinger P., Aronsen E., Boss P., Rindlisbacher G., Practical Experience With The Drying Of Power Transformers In The Field, Applying the LFH Technology, CIGRE Session 2004, WG A2, Paper 205
- [14] Rozga P., Beroual A., Przybyłek P., Jaroszewski M., Strzelecki K., A review on synthetic ester liquids for transformer applications, *Energies*, Vol. 13, n.23, 2020, 6249
- [15] Przybyłek P., Moranda H., Mościcka-Grzesiak H., Cybulski M., Laboratory model studies on the drying efficiency of transformer cellulose insulation using synthetic ester, *Energies*, Vol. 13, n.13, 2020, 3467
- [16] Przybyłek P., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Raport z badań prowadzonych w okresie 01.07.2018-31.12.2019 r. w ramach Etapu 1
- [17] CIGRE Brochure 436, WG A2.35, Experiences in service with new insulating liquids, 2010
- [18] Walczak K., Przybyłek P., Mościcka-Grzesiak H., Morańda H., Sikorski W., Cybulski M., Raport z badań prowadzonych w okresie 01.01.2020-31.12.2020 w ramach Etapu 1
- [19] Przybyłek P., Water saturation limit of insulating liquids and hygroscopicity of cellulose in aspect of moisture determination in oil-paper insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 23, n.3, 2016, pp. 1886-1893
- [20] Fatyga P., Morańda H., Ocena składu procentowego mieszaniny oleju mineralnego i estru syntetycznego po wymianie oleju na ester w transformatorze energetycznym, Materiały Międzynarodowej konferencji transformatorowej Transformator '17, Toruń, 9-11.05.2017, Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, 2017, 233-242