

## **PRZYSPIESZONE BADANIA STARZENIOWE W OCENIE TRWAŁOŚCI GEORUSZTU POLIMEROWEGO WYKORZYSTYWANEGO DO WZMOCNIENIA SKARPY NA SKŁADOWISKU ODPADÓW**

Agnieszka Kiersnowska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** Głównym zagadnieniem rozważanym w artykule jest ocena procesu starzenia oraz trwałość jednokierunkowego georusztu PEHD zastosowanego na składowisku odpadów do stabilizacji skarpy. Z wymogu zapewnienia bezpieczeństwa geotechnicznego składowisk wynika konieczność przewidywania zachowania się materiałów geosyntetycznych już na etapie projektowania. Aby tego dokonać, wskazane jest przeprowadzanie w laboratorium badań starzenia lub przyspieszonego starzenia materiałów używanych do realizacji konstrukcji geotechnicznych. W artykule zawarta została analiza właściwości mechanicznych georusztu jednokierunkowego poddanego przyspieszonemu starzeniu w warunkach laboratoryjnych. Przedstawiono metodykę badań przyspieszonych oraz wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek jednokierunkowego georusztu PEHD.

**Słowa kluczowe:** starzenie, badania przyspieszone, georuszty, trwałość, składowiska odpadów

### **WSTĘP**

Do głównych wątpliwości, jakie nasuwają się przy stosowaniu geosyntetyków do wzmocnień, zalicza się ich trwałość w czasie. Dotychczasowe doświadczenia z praktyki sięgają okresu obejmującego ponad 30 lat, jednak wymagany czas pracy tych materiałów, szczególnie na składowiskach odpadów, jest znacznie dłuższy [Koda 2011]. W takim zastosowaniu zalecane są specjalne badania i przyjmowanie odpowiednio zredukowanych parametrów uwzględniających zmiany właściwości wyrobów w czasie ich eksploatacji. W celu prognozowania zachowania się materiału geosyntetycznego w określonym śro-

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Agnieszka Kiersnowska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: agnieszka\_kiersnowska@sggw.pl

dowisku coraz częściej stosowane są laboratoryjne badania przyspieszone, modelujące wpływ czynników chemicznych i innych, wynikających ze środowiska, w którym dany materiał został użyty.

Proces starzenia się materiałów geosyntetycznych można przedstawić jako równoczesne połączenie fizycznego i chemicznego starzenia [Hsuan i in. 1998]. W wyniku starzenia się dochodzi do takich procesów, jak: wyczerpywanie się przeciwutleniaczy i plastyfikatorów, zmiany masy cząsteczkowej, tworzenie się wolnych rodników oraz zwiększenie kruchości polimeru [Rowe i in. 2008]. Starzenie fizyczne związane jest z degradacją, która nie pociąga za sobą zmiany w strukturze cząsteczkowej łańcuchów polimerowych. Niektóre z tych mechanizmów obejmują transfer masy z i do środowiska otaczającego materiał (absorpcji rozpuszczalnika, ekstrakcji dodatku itp.). Inne obejmują zmianę wewnętrznej organizacji łańcucha polimerowego w materiale, to znaczy zmiany morfologii (orientacji łańcuchów, stopnia krystaliczności itd.) [Kay i in. 2004]. Mechanizm starzenia chemicznego obejmuje zmianę w strukturze cząsteczkowej łańcuchów polimerowych [Kay i in. 2004], w wyniku czego dochodzi do spadku właściwości mechanicznych i ostatecznie do uszkodzenia geosyntetyku. Atak chemiczny może zachodzić bezpośrednio w gruntach kwaśnych lub zasadowych oraz na składowiskach odpadów. W zależności od rodzaju związku chemicznego zmiany struktury polimeru można uzyskać przez utlenianie, sieciowanie, zrywanie łańcucha polimerowego, pęcznienie lub rozpuszczanie polimerów. Dodatkowo efekty degradacji chemicznej mogą być przyspieszane przez wpływ podwyższonej temperatury [Mathur i in. 1994]. Georuszty z polietylenu o dużej gęstości (PEHD) są bardzo odporne na działanie substancji chemicznych i ich właściwości nie ulegają łatwo pogorszeniu pod wpływem środków alkalicznych i kwasów (oprócz kwasów utleniających), roztworów soli lub mikroorganizmów, ponieważ mają one niepolarny charakter [Kay i in. 2004], jednakże ze względu na swoją budowę są narażone na degradację utleniającą. Podczas degradacji utleniającej (oksydacyjnej) łańcuchy polimeru poddawane są reakcji z tlenem, co prowadzi do zmian w strukturze i morfologii polimeru [Sangam i Rowe 2002b]. Degradacja oksydacyjna jest uważana za najbardziej szkodliwą dla geosyntetyków z PEHD [Hawkins 1984]. Pod wpływem procesu utleniania polimeru powstające wolne rodniki prowadzą do reakcji łańcuchowych samoutleniania. Tworzenie się wolnych rodników powoduje zerwanie łańcuchów polimerowych, co prowadzi do spadku masy cząsteczkowej polimeru i skutkuje tym, że materiały te w konsekwencji stają się kruche oraz podatne na korozję naprężeniową [Tisinger i Giroud 1993]. Obecność metali ciężkich przyspiesza szybkość reakcji utleniania [Osawa i Ishizuka 1973]. Zgodnie z Viebkeet i innymi [1994] oraz Hsuan i Koerner [1998] degradację utleniającą polietylenu można podzielić na trzy odrębne etapy:

- etap I, obejmujący czas wyczerpywania się przeciwutleniaczy, spowodowany ich zużyciem w wyniku reakcji chemicznej z tlenem,
- etap II, stanowiący czas indukcji potrzebny do wystąpienia degradacji oksydacyjnej polimeru,
- etap III, stanowiący właściwą degradację polimeru prowadzącą do pogorszenia jego właściwości mechanicznych.

Przy stosowaniu poliolefinowych geosyntetyków głównym problemem jest oszacowanie ich trwałości w różnych warunkach starzenia. Zastosowane przeciwutleniacze podczas procesu wytwarzania chronią materiał przed jego degradacją, jednak stopniowo

wyczerpują się w czasie. Najlepszym sposobem do określenia trwałości eksploatacyjnej tych materiałów jest pobranie próbek geosyntetyku ze środowiska, w którym służył, i poddanie ich specjalistycznym badaniom. Jednak okres stosowania georusztów jest zbyt krótki (ponad 30 lat), aby wyciągnąć z tych badań jednoznaczne wnioski. W takich przypadkach coraz częściej stosuje się laboratoryjne badania przyspieszonego starzenia. Geosyntetyki stosowane na składowiskach odpadów są przedmiotem wielu prac badawczych [Chai i in. 2005, Bouazza i Vongpaisal 2006, Koerner i Koerner 2006, Touze-Foltz i Barroso 2006, Thusyanthan i in. 2007].

Sangam i Rowe [2002b] przeprowadzili testy przyspieszonego starzenia przy użyciu geomembrany PEHD w pięciu różnych wartościach temperatury (22–85°C), stosując trzy różne media do inkubacji georusztu: syntetyczne stałe odpady komunalne, symulowane odcieki składowisk odpadów i wodę destylowaną. Wykazały one, że przeciwutleniacze wyczerpywały się znacznie szybciej w cieczach. Materiały geosyntetyczne zastosowane na składowiskach odpadów szczególnie narażone są na znajdujące się tam odcieki. Skład odcieków zależy od wieku i rodzaju odpadów oraz typu składowiska [Castaldo i in. 1996]. Stężenia składników w odciekach mogą zmieniać się codziennie, jednak podstawowe składniki są dobrze znane i obejmują związki organiczne (głównie kwasy tłuszczowe) i nieorganiczne (głównie sole, z niskimi stężeniami metali ciężkich) oraz środki powierzchniowo czynne. Sangam i Rowe [2002a], Rowe i inni [2008] oraz Rowe i Rimal [2008] przez wiele lat badali wpływ wymienionych wcześniej substancji zawartych w odciekach na geomembrany. Zaobserwowano, że najprostszy ze stosowanych odcieków, zawierający w swoim składzie sole metali ciężkich i substancje powierzchniowo czynne w wodzie, jest wystarczający, aby symulować wpływ odcieków na materiał geosyntetyczny na składowisku odpadów. Stwierdzono, że kwasy tłuszczowe i typowe jony charakterystyczne dla odcieków (np.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ) nie miały istotnego wpływu na czas wyczerpywania się przeciwutleniaczy, natomiast środek powierzchniowo czynny był głównym składnikiem wpływającym na czas indukcji utleniania tworzywa. Nawet mała ilość środka powierzchniowo czynnego znacząco wpływa na wyczerpywanie się przeciwutleniaczy. Zaobserwowano również, że przeciwutleniacze wyczerpywały się w szybszym tempie w kwaśnym lub zasadowym środowisku (pH 4 i 10) niż w bardziej obojętnym (pH od 6 do 8).

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu czynników chemicznych zawartych w odciekach na składowiskach odpadów w Polsce na właściwości wytrzymałościowe georusztu jednoosiowego PEHD.

## MATERIAŁY I METODY

Badany materiał to georuszt jednokierunkowy stosowany do wzmocnienia niestabilnych (słabych) gruntów oraz gruntów antropogenicznych na składowiskach odpadów. Tego typu georuszty stosuje się w miejscach, gdzie zachodzi potrzeba zwiększenia wytrzymałości gruntu na ścinanie (nasypy ziemne, konstrukcje stromych zboczy) oraz posadowienia konstrukcji inżynierskich na słabym podłożu [Wesolowski i in. 2000].

Georuszt jedokierunkowy produkowany jest w procesie wytlaczania i perforacji układu otworów w arkuszu z polietylenu o dużej gęstości. W dalszym etapie produkcji

perforowane pasma PEHD rozciągane są w kontrolowanej temperaturze w kierunku podłużnym, w wyniku czego długie łańcuchy cząsteczkowe polimeru zostają zorientowane w kierunku rozciągania, co znacznie zwiększa wytrzymałość, sztywność i odporność na pelzanie tego materiału. Stąd też wynika nazwa „jednokierunkowy”, bo mogą być też geomembrany rozciągane (a zatem i orientowane) w dwóch kierunkach, na przykład folie BOPP (*Biaxially Oriented PolyPropylene*) lub georuszty dwukierunkowe. Podstawowe parametry badanego georusztu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne georusztu deklarowane przez producenta  
Table 1. Specifications geogrid declared by the manufacturers

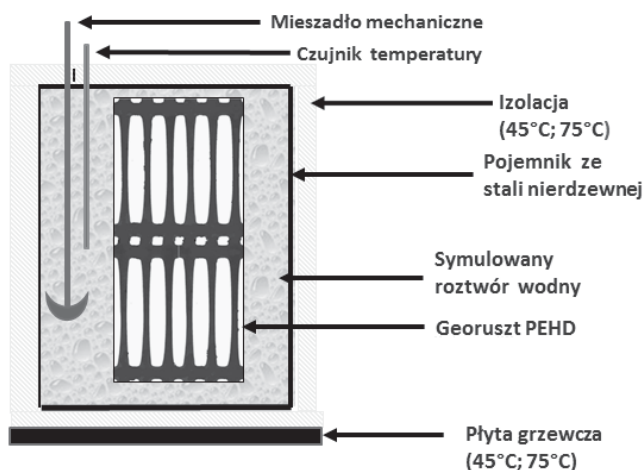
Parametr Parameter	Jednostka Unit	Materiał Material
Masa powierzchniowa Mass per unit area	kg·m <sup>-2</sup>	0,45
Wymiar oczka Aperture size	mm	16 x 235
Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength	kN·m <sup>-1</sup>	64,5
Wydłużenie względne przy zerwaniu Elongation at rupture	%	11 ±3

Polietylen o dużej gęstości stosowany w procesie wytwarzania georusztu jednokierunkowego jest tworzywem termoplastycznym o wysokim stopniu krystaliczności. Ze względu na brak heteroatomów i podwójnych wiązań w łańcuchu jest bardziej odporny na działanie związków chemicznych oraz starzenie atmosferyczne i termiczne niż inne tworzywa termoplastyczne [Florjańczyk i Penczek 1997, Greenwood i in. 2012].

Przyspieszone badania starzeniowe prowadzone były w Katedrze Chemii i Technologii Polimerów Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej. Zgodnie z podobnymi badaniami opisanymi w literaturze [Sangam i Rowe 2002a, Rowe i in. 2008] oraz z warunkami panującymi podczas eksploatacji georusztów (zasypanie gruntem antropogenicznym) jako czynniki powodujące degradację wytypowano temperaturę oraz skład środowiska wodnego, co zostało opisane w tabelach 2 i 3.

Próbki georusztu (520 × 240 mm) umieszczono, przedzielając je szklanymi rurkami w pojemniku ze stali nierdzewnej o pojemności 50 litrów. Pojemnik wyposażono w mieszadło mechaniczne oraz czujnik temperatury, a wymaganą temperaturę zadawano za pomocą płyt grzewczych (rys. 1).

Skład symulowanego roztworu podano w tabeli 2 – wartości te zaczerpnięto z opracowania Rowe i inni [2008], natomiast zawartość metali ciężkich w roztworze (tab. 3) zmodyfikowano dla warunków panujących na składowiskach odpadów w Polsce [Raporty roczne 1993–2014, Pleczyński i in. 1997]. Próbki georusztu inkubowano w trzech wartościach temperatury 25, 45 i 75°C, pH roztworu dla każdej temperatury korygowano do 6. Okres inkubacji próbek georusztu zaplanowano na 12 miesięcy. Próbki do badań wytrzymałości na zerwanie (badane w trakcie realizacji) pobierano z inkubowanego roztworu co 2 miesiące. W celu utrzymania ciągłości wyczerpywania przeciwutleniacza z georusztu roztwór wymieniano co 2 miesiące.



Rys. 1. Schemat stanowiska do przyspieszonych badań starzeniowych

Fig. 1. The scheme of the test to accelerated aging tests

Tabela 2. Skład syntetycznych odcieków

Table 2. Composition of synthetic leachates

Składnik Component	Stężenie [ml·l <sup>-1</sup> ] Concentration [ml·l <sup>-1</sup> ]
Środek powierzchniowo czynny Triton x 100 Surfactant Titron x 100	5
Roztwór metali ciężkich <sup>a</sup> Solution of heavy metals	1
pH	korygowano poprzez dodanie NaOH lub H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

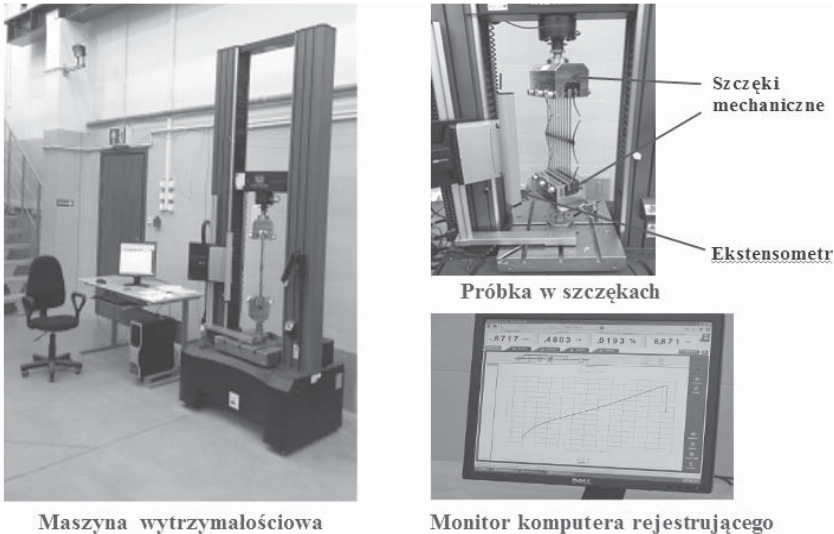
<sup>a</sup>Skład roztworu podano w tabeli 3.

Tabela 3. Zmodyfikowany skład roztworu metali ciężkich

Table 3. The modified composition of the solution of heavy metals

Składnik Component	Wzór cząsteczkowy Formula	Wielkość Quantity
Siarczan żelaza(II) 7 – wodny Ferrous Sulfate Heptahydrate	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	4480 mg·l <sup>-1</sup>
Siarczan cynku(II) 7 – wodny Zinc Sulfate Heptahydrate	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	360 mg·l <sup>-1</sup>
Siarczan miedzi(II) 5 – wodny Cupric Sulfate Pentahydrate	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	40 mg·l <sup>-1</sup>
Siarczan glinu 16 – wodny Aluminum Sulphate 16 – Hydrate	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 16H <sub>2</sub> O	30 mg·l <sup>-1</sup>
Siarczan manganu 4 – wodny Manganous Sulfate Monohydrate	MnSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	60 mg·l <sup>-1</sup>
Siarczan niklu(II) 6 – wodny Nickel(II) Sulfate	NiSO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	50 mg·l <sup>-1</sup>
Kwas siarkowy Sulfuric Acid	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 mg·l <sup>-1</sup>

Badania na rozciąganie georusztu jednokierunkowego przeprowadzono w Pracowni Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Laboratorium Centrum Wodnego SGGW w Warszawie (rys. 2). Badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 10139:2010 przy użyciu maszyny wytrzymałościowej firmy Instron o maksymalnej sile 100 kN.



Rys. 2. Stanowisko do wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie  
 Fig. 2. Laboratory equipment for tensile testing

Wycięto próbkę georusztu jednokierunkowego szerokości efektywnej  $\geq 200$  mm (9 żeber), szerokości rzeczywistej (11 żeber, 2 zewnętrzne żebra przecięto po zainstalowaniu próbki georusztu w szczękach) oraz długości 520 mm (zawierającej 3 rzędy węzłów).

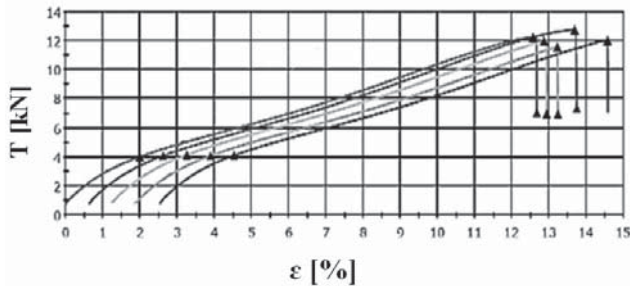
Punkty odcinka pomiarowego dla ekstensometru zaznaczono (za pomocą białego markera) w ten sposób, aby znajdowały się w połowie odległości między skrajnymi rzędami węzłów a rzędem węzłów wewnątrz próbki, na środkowym żebrze elementów rozciągających (odległość między punktami 240 mm). Tak przygotowaną próbkę georusztu mocowano w szczękach maszyny wytrzymałościowej, ustalano bazę pomiarową dla ekstensometru i poddawano wzdłużnej sile rozciągającej przy stałej prędkości rozciągania odcinka pomiarowego  $20 \pm 5\%$  na minutę.

## WYNIKI

Do analizy wytrzymałości na rozciąganie geosyntetyków metodą szerokich próbek zgodnie z wymogami normy PN-EN ISO 10319:2010 przyjęto 5 próbek georusztu. W przypadku georusztu jednokierunkowego badanie na rozciąganie zostało przeprowadzone w kierunku wzdłużnym do kierunku wytwarzania materiału.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładową zależność wydłużenia względnego ( $\varepsilon$ ) do wytrzymałości na rozciąganie ( $T$ ) dla próbek georusztu przed próbą przyspieszonego starzenia (próbki zerowe).

Na podstawie analizy statystycznej w tabeli 4 przedstawiono średnią wytrzymałość na rozciąganie ( $T_{\max}$ ) oraz wydłużenie względne przy maksymalnym obciążeniu  $\varepsilon_{\max}$ , a także odchylenia standardowe ( $S$ ) i współczynniki zmienności ( $V$ ) dla próbek przed zastosowaniem przyspieszonego starzenia oraz dla próbek po przeprowadzeniu przyspieszonego starzenia w laboratorium, po 2, 4, 6 miesiącach, dla trzech wartości temperatury inkubacji: 25, 45 oraz 75°C. Dla lepszego zilustrowania otrzymanych wyników (tab. 4), przedstawiono je również w postaci wykresów (rys. 4, 5 i 6).



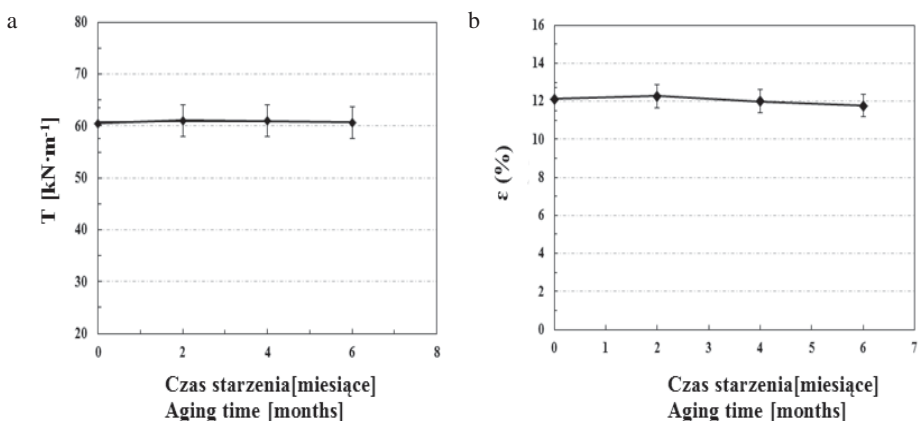
Rys. 3. Zależność wydłużenia względnego ( $\varepsilon$ ) od wytrzymałości na rozciąganie ( $T$ ) dla 5 badanych próbek przed zastosowaniem przyspieszonego starzenia (typowe krzywe)

Fig. 3. Strain and load relationship for the 5 samples tested without the use of accelerated aging (typical curves)

Tabela 4. Średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie ( $T$ ) i wydłużenia względnego ( $\varepsilon$ ) dla badanych próbek georusztu jednokierunkowego

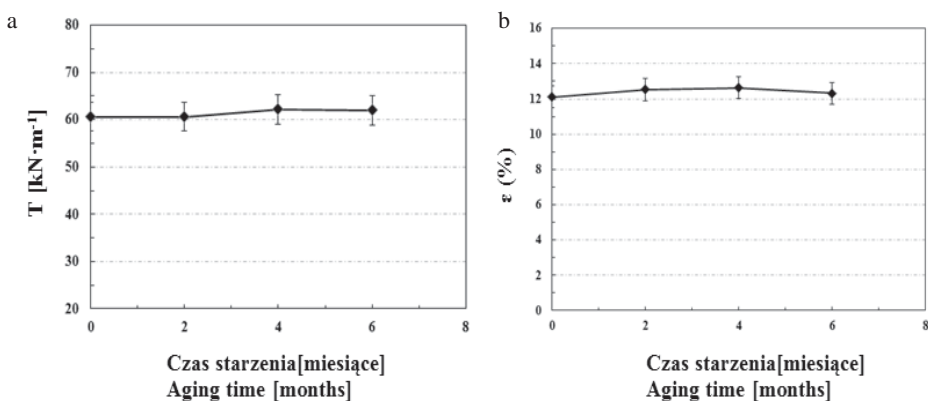
Table 4. Average values of tensile strength ( $T$ ) and strain ( $\varepsilon$ ) at rupture lengthwise for tested uniaxial geogrid samples

Parametr Parameter	przed starze- niem wi- thout aging	Próba Sample									
		po 2 miesiącach after 2 months			po 4 miesiącach after 4 months			po 6 miesiącach after 6 months			
Temperatura Temperature [°C]	–	25	45	75	25	45	75	25	45	75	
$T_{\max}$	[kN·m <sup>-1</sup> ]	<b>60,56</b>	<b>61,09</b>	<b>60,60</b>	<b>62,10</b>	<b>61,00</b>	<b>62,20</b>	<b>61,10</b>	<b>60,65</b>	<b>62,01</b>	<b>57,75</b>
	$S$ [kN·m <sup>-1</sup> ]	0,42	0,30	0,41	0,27	0,31	0,15	0,44	0,46	0,27	0,42
	$V$ [%]	0,69	0,48	0,67	0,43	0,50	0,24	0,75	0,76	0,43	0,72
	[%]	12,10	12,28	12,53	14,89	12,01	12,64	14,48	11,93	12,31	13,43
$\varepsilon_{\max}$	$S$ [%]	0,70	0,43	0,40	0,86	0,20	0,50	1,03	0,44	0,26	0,81
	$V$ [%]	0,57	0,33	0,3	0,57	0,160	0,39	0,71	0,34	0,21	0,60



Rys. 4. Zależność czasu starzenia od wytrzymałości na rozciąganie  $T$  (a) oraz od wydłużenia względnego  $\varepsilon$  (b) dla próbek georusztu jednokierunkowego inkubowanych w temperaturze 25°C

Fig. 4. The relationship aging time of the tensile strength  $T$  (a) and strain  $\varepsilon$  (b) for uniaxial geogrid samples incubated at 25°C



Rys. 5. Zależność czasu starzenia od wytrzymałości na rozciąganie  $T$  (a) oraz od wydłużenia względnego  $\varepsilon$  (b) dla próbek georusztu jednokierunkowego inkubowanych w temperaturze 45°C

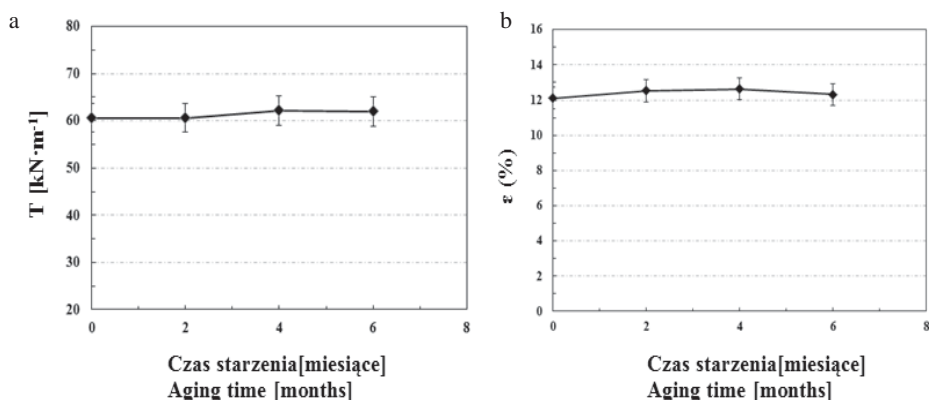
Fig. 5. The relationship aging time of the tensile strength  $T$  (a) and the strain  $\varepsilon$  (b) for uniaxial geogrid samples incubated at 45°C

## DYSKUSJA

Po przeprowadzeniu 6-miesięcznych przyspieszonych badań starzeniowych w temperaturze 25°C nie stwierdzono istotnych statystycznie zmian wpływających na średnią wytrzymałość na rozciąganie oraz na średnie wydłużenie względne.

Niewielki wzrost wartości średniej wytrzymałości na rozciąganie dla próbek inkubowanych w temperaturze 45°C przez 6 miesięcy, z 60,56 kN·m<sup>-1</sup> (próbka zerowa), 60,60 kN·m<sup>-1</sup> (po 2 miesiącach przyspieszonego starzenia) do 62,20 kN·m<sup>-1</sup> (po 4 mie-





Rys. 6. Zależność czasu starzenia od wytrzymałości na rozciąganie  $T$  (a) oraz od wydłużenia względnego  $\epsilon$  (b) dla próbek georusztu jednokierunkowego inkubowanych w temperaturze 75°C

Fig. 6. The relationship aging time of the tensile strength  $T$  (a) and strain  $\epsilon$  (b) for uniaxial geogrid samples incubated at 75°C

siącach przyspieszonego starzenia) oraz do 62,01 kN·m<sup>-1</sup> (po 6 miesiącach przyspieszonego starzenia), świadczy o wzroście stopnia krystaliczności polimeru w georuszcie PEHD. Zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie jest konsekwencją wzrostu stopnia krystaliczności polimeru [Apse 1989, Lustiger i Rosenberg 1989]. Natomiast nie zauważono istotnych zmian procesu starzenia wpływających na średnie wydłużenie względne badanego materiału.

Najistotniejsze są wyniki dla próbek inkubowanych w 75°C, gdzie zauważalne jest wyraźne zmniejszenie się średniej wytrzymałości na rozciąganie dla próby po 6 miesiącach inkubacji (57,75 kN·m<sup>-1</sup>) w stosunku do próby zerowej (60,56 kN·m<sup>-1</sup>). Wartość wytrzymałości na rozciąganie zmniejszyła się o 5%. Wartości średnie wydłużenia względnego dla próbek inkubowanych w 75°C są większe od wartości otrzymanych dla próby zerowej o średnio 16%.

## PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych przyspieszonych badań starzeniowych w laboratorium, po 6 miesiącach inkubacji próbek georusztu jednokierunkowego PEHD dla 3 różnych wartości temperatury, nie stwierdzono znaczących zmian wytrzymałości materiału, co świadczy, że wybrany materiał jest trwały i odpowiednio dobrany do środowiska, w którym pracuje. Należy jednak zauważyć, że badania są w trakcie realizacji (próbki będą inkubowane jeszcze przez kolejne 6 miesięcy). Z otrzymanych wyników można wnioskować, że niewątpliwie negatywny wpływ na parametry wytrzymałościowe georusztu ma podwyższona temperatura do poziomu 75°C, która może wystąpić wewnątrz składowiska.

## PODZIĘKOWANIA

Pragnę podziękować za pomoc w realizacji badań panu mgr. inż. Piotrowi Smektale oraz panu inż. Ryszardowi Mazurczukowi.

## PIŚMIENNICTWO

- Apse, J.L. (1989). Polyethylene resins for geomembrane applications. In: *Durability and Aging of Geosynthetics*. Ed. R.M. Koerner. Elsevier Applied Science Publisher, Amsterdam, Netherlands, 159–176.
- Bouazza, A., Vangpaisal, T. (2006). Laboratory investigation of gas leakage rate through a GM/GCL composite liner due to a circular defect in the geomembrane. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 2, 110–115.
- Bouazza, A., Vangpaisal, T., Abuel-Naga, H., Kodikara, J. (2008). Analytical modelling of gas leakage rate through a geosynthetic clay liner–geomembrane composite liner due to a circular defect in the geomembrane. *Geotextiles and Geomembranes*, 26, 2, 122–129.
- Castaldo, S., Viviani, G., Cazzuffi, D., Fede, L. (1996). Chemical compatibility of geomembranes in presence of synthetic landfill leachate. *Proceedings of EuroGeo 1st European Geosynthetics Conference and Exhibition, Maastricht*. In: *Geosynthetics: applications, design and construction*. Ed. de Groot, Den Hoedt and Termaat. Balkema, Rotterdam, 659–666.
- Chai, J.C., Miura, N., Hayashi S. (2005). Large-scale tests for leachate flow through composite liner due to geomembrane defects. *Geosynthetics International*, 12, 3, 134–144.
- Florjańczyk, Z., Penczek, S., red. (1997). *Chemia polimerów. Cz. II. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa*.
- Greenwood, J.H., Schroeder, H.F., Voskamp, W. (2012). CUR Report 243. *Durability of Geosynthetics*. Stichting CURNET, Gouda, The Netherlands.
- Hawkins, W.L. (1984). *Polymer Degradation and Stabilization. Polymer/Properties and Applications*, 8. Ed. H.J. Harwood. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, Germany.
- Hsuan, Y.G., Koerner, R.M. (1998). Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 124 (6), 532–541.
- Kay, D., Blond, E., Mlynarek, J. (2004). *Geosynthetics durability: a polymer chemistry issue*. 57th Canadian Geotechnical Conference GEO, Quebec.
- Koda, E. (2011). *Stateczność rekultywowanych składowisk odpadów i migracja zanieczyszczeń przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej. Rozprawy Naukowe i Monografie*, 394. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Koerner, G.R., Koerner, R.M. (2006). Long-term temperature monitoring of geomembranes at dry and wet landfills. *Geotextiles and Geomembranes*, 24, 1, 72–77.
- Lustiger, A., Rosenberg, J. (1989). Predicting the service life of polyethylene in engineering applications. In: *Durability and Aging of Geosynthetics*. Ed. R.M. Koerner. Elsevier Applied Science, Amsterdam, Netherlands, 212–229.
- Mathur, A., Netravali, A.N., O'Rourke, T.D. (1994). Chemical aging effect on the physico-mechanical properties of polyester and polypropylene geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, 13, 591–626.
- Osawa, Z., Ishizuka, T. (1973). Catalytic action of metal salts in autoxidation and polymerization (X): the effect of various methyl stearates on the thermal oxidation of 2,6,10,14-tetramethylpentadecane. *Journal of Applied Polymer Science*, 17, 9, 2897–2907.
- Pleczyński, J., Wesolek, J., Magdziarek, M. (1997). *Gospodarka odciekami na składowiskach odpadów komunalnych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska*, 22, Warszawa.
- PN-EN ISO 10319: 2010 *Geosyntetyki. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek*.

- Raporty roczne (1993–2014). Monitoring wód podziemnych i powierzchniowych w rejonie składowiska i kompostowni „Radiowo”.
- Rowe, R.K., Rimal, S. (2008). Depletion of antioxidants from an HDPE geomembrane in a composite liner. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134, 1, 68–78.
- Rowe, R.K., Sangam, H., (2002). Durability of HDPE geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 77–95.
- Rowe, K., Islam, M.Z., Hsuan, Y.G. (2008). Leachate chemical composition effects on OIT depletion in an HDPE geomembrane. *Geosynthetic International*, 15, 2.
- Rowe, R.K., Rimal, S., Sangam, H. (2009). Ageing of HDPE geomembrane exposed to air, water and leachate at different temperatures. *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 137–15.
- Sangam, H.P., Rowe, R.K. (2002a). Durability of HDPE geomembranes – a review. *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 2, 77–95.
- Sangam, H.P., Rowe, R.K. (2002b). Effects of exposure conditions on the depletion of antioxidants from high-density polyethylene (HDPE) geomembranes. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 6, 1221–1230.
- Thusyanthan, N.I., Madabhushi, S.P.G., Singh, S. (2007). Tension in geomembranes on landfill slopes under static and earthquake loading – Centrifuge study. *Geotextiles and Geomembranes*, 25, 2, 78–95.
- Tisinger, L.G., Giroud, J.P. (1993). The durability of HDPE geomembranes. *Geotechnical Fabrics Report*, 11, 6, 4–8.
- Touze-Foltz, N., Barroso, M. (2006). Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through GCL – geomembrane composite liners. *Geosynthetics International*, 13, 2, 73–82.
- Viebkeet, J., Elble, E., Ifwarson, M., Gedde, U.W. (1994). Degradation of unstabilized medium-density polyethylene pipes in hot-water applications. *Polymer Engineering and Science*, 34, 17, 1354–1361.
- Wesołowski, A., Krzywosz, Z., Brandyk, T. (2000). *Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

## ACCELERATED AGING TESTS IN ASSESSMENT OF THE DURABILITY GEOGRID POLYMER USED TO REINFORCE THE SLOPE ON LANDFILL

**Abstract.** The main issue considered in the article is to assess the process of aging and durability of uniaxial geogrids HDPE used for landfill to stabilize the slope. With the requirement to ensure the safety of geotechnical landfills follows the need to predict the behavior of geosynthetic materials at the design stage. To do this it is advisable to conduct laboratory testing of aging or accelerated aging of materials used for the implementation of geotechnical structures. The article contains an analysis of the mechanical properties of uniaxial geogrids subjected to accelerated aging in laboratory conditions. Methods of accelerated tests and the results of tensile strength using a broad sample uniaxial geogrids HDPE are discussed.

**Key words:** aging, accelerated tests, geogrid, durability, landfills

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.03.2016

Cytowanie: Kiersnowska, A. (2016). Przyspieszone badania starzeniowe w ocenie trwałości georusztu polimerowego wykorzystywanego do wzmocnienia skarpy na składowisku odpadów. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 15 (1), 107–117.