

SYMULACJA PRZEPIYU CIEPŁA W KAMIENNYM AKUMULATORZE O LOSOWEJ STRUKTURZE ZŁOŻA

Wojciech Mueller, Sergiusz Maćkowiak

Inżynierii Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Streszczenie. Akumulatory kamienne energii cieplnej z uwagi na swoją prostotę budowy i możliwość wykorzystania miejscowych złóż są predestynowane do wykorzystania w rolnictwie. Względy ekonomiczne powodują, iż często struktura złoża ma charakter losowy. W pracy został zaprezentowany kolejny, nowy probabilistyczny model matematyczny przepływu ciepła, który pełniej w stosunku do wcześniejszych modeli uwzględnia stochastyczny charakter struktury złoża oraz dodatkowo odwzorowuje nierównomierny przepływ powietrza przez akumulator podczas fazy ładowania. Jego pozytywna weryfikacja stała się przyczynkiem dalszych badań symulacyjnych, zmierzających do identyfikacji cech losowych wielkości, opisujących stan cieplny kamiennego akumulatora.

Słowa kluczowe: kamienny akumulator ciepła, badania symulacyjne

Wprowadzenie

Uwzględnienie w procesie modelowania wybranego systemu empirycznego, losowości jego struktury, jak i probabilistycznego oddziaływania otoczenia implikuje stochastyczny charakter wielkości fizycznych opisujących ów system. Rozpoznanie ich cech losowych jest interesujące z poznawczego punktu widzenia, ale czasami trudne, bądź niemożliwe do osiągnięcia. Pomocne są tutaj modele matematyczne odwzorowywane następnie w systemach informatycznych, które stają się cennym narzędziem badawczym, po ich pozytywnej walidacji.

Przedmiotem poznawczych zainteresowań autorów są kamienne akumulatory ciepła, które z uwagi na swoje cechy dobrze się wpisuje do tej grupy systemów empirycznych. Budowane dotychczas modele matematyczne deterministyczne i stochastyczne bazują na grupie założeń wspólnych dla wszystkich modeli. Jednym z nich jest traktowanie elementów złoża jako kul lub brył regularnych. W związku z powyższym powierzchnia międzyfazowa, istotna przy identyfikowaniu ciepła wnikania jest określona na podstawie średnicy równoważnej kamieni tworzących złożo. Z uwagi na łatwość pomiaru średnicy równoważnej oraz na fakt, że często wypełnienie regeneratorów stanowi żwir o odpowiedniej granulacji, przyjęte założenia uznajemy za uzasadnione i w pełni wystarczające na potrzeby praktyki. Jednak, gdy złożo regeneratora stanowi tłuczeń granitowy względnie inny materiał o zróżnicowanej geometrii, którego elementy składowe swoim kształtem zdecydowanie odbiegają od kul, rodzą się wątpliwości, co do poprawności tak przyjętego założenia.

Wytworzone dotychczas modele probabilistyczne również pomijały zjawisko nierównomierności przepływu powietrza przez złożę wychodząc z założenie, iż działania konstrukcyjne podejmowane przy budowie akumulatorów, takie jak komory wyrównawcze na wejściu i wyjściu oraz ograniczenie minimalnej długości względnie wysokości złoża minimalizują to niekorzystne zjawisko. Jednak pomimo podejmowanych wysiłków konstrukcyjnych zjawiska tego nie wyeliminowano, o czym przekonują nas wyniki przeprowadzonych i opublikowanych badań [Hollands i in. 1984; Parker i in. 1983].

Postać modelu wymiany ciepła

Jako podstawę budowy nowego probabilistycznego modelu wymiany ciepła dla fazy ładowania kamiennego akumulatora energii cieplnej przyjęto model wcześniejszy [Mueller i in 2003], w którym zrezygnowano z dwóch istotnych założeń upraszczających:

- przepływ wymuszony powietrza przez złożę ma charakter równomierny,
- związek pomiędzy średnicą równoważną kamienia, a jego powierzchnią ma charakter deterministyczny.

Nowo powstały probabilistyczny model wymiany ciepła tworzy poniższy układ równań różniczkowych (1 i 2) zwielokrotniony podziałem akumulatora na sekcje w płaszczyźnie YZ (rys. 1):

$$\dot{m}_{i,j} c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = \underline{h} \underline{A}_{i,j} (T_f - T_m) \quad (1)$$

$$B_{i,j} (1 - \underline{\varepsilon}) \rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \underline{h} \underline{A}_{i,j} (T_f - T_m) - U a_{ww} (T_m - \underline{T}_{je}) \quad (2)$$

gdzie :

$$\underline{A}_{i,j} = \frac{24(1 - \underline{\varepsilon}) B_{i,j} \underline{F}}{\pi \underline{D}^3} \quad (3)$$

$$\underline{F} = 75,4802 \underline{D}^{2,3364} + \underline{E}_i \quad (4)$$

wraz z warunkami początkowo-brzegowymi:

dla $t = 0$ $T_m = T_{mp}$ (5)

oraz

dla $x = 0$ $T_f = T_{fo}$ (6)

gdzie:

- $\underline{A}_{i,j}$ – powierzchnia międzyfazowa sekcji przypadająca na jednostkę długości regeneratora [$m^2 \cdot m^{-1}$],
- a_{ww} – zewnętrzna powierzchnia graniczna akumulatora przypadająca na sekcję i na jednostkę długości regeneratora [$m^2 \cdot m^{-1}$],
- $B_{i,j}$ – wielkość pola przekroju poprzecznego sekcji regeneratora [m^2],
- \underline{D} – średnica równoważna [m],

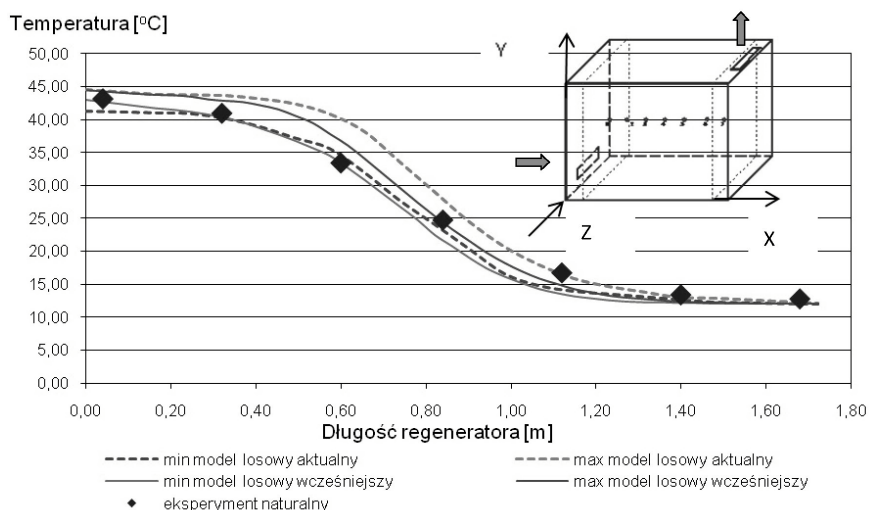
\underline{E}_i	– zmienna losowa o rozkładzie zmiennej \underline{E} i o wartości oczekiwanej równej zero [m ²],
\underline{F}	– pole powierzchni kamienia [m ²],
T_f	– temperatura płynu [K],
T_m	– temperatura kamienia [K],
T_{fo}	– temperatura płynu wchodzącego do złoża [K],
\underline{T}_{fe}	– temperatura otoczenia [K],
T_{mp}	– temperatura początkowa magazynu [K],
\underline{h}	– współczynnik wnikania ciepła na granicy dwóch ośrodków [W·m ⁻² ·K],
c_f i c_m	– ciepło właściwe płynu i kamienia [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹],
$\dot{m}_{i,j}$	– masowe natężenie przepływu przypadające na sekcję [kg·s ⁻¹],
$\underline{\varepsilon}$	– porowatość ośrodka [-],
ρ_m	– gęstość kamienia [kg·m ⁻³],
t	– czas [s],
U	– współczynnik wymiany ciepła pomiędzy ścianą regeneratora a otoczeniem [W·m ⁻² ·K ⁻¹],
x	– współrzędna liniowa [m],
i,j	– indeksy odpowiednio w kierunku osi Y i Z wynikające z podziału akumulatora w płaszczyźnie YZ.

Wielkości podkreślone w powyższych równaniach to zmienne losowe. Równanie 4 obrazujące związek pomiędzy polem powierzchni, a średnicą równoważną kamienia dotyczy tłucznia granitowego, stanowiącego wypełnienie akumulatora. Zostało ono uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań, podczas realizacji których wykorzystano oryginalną metodykę zaproponowaną przez autorów [Mueller i in. 2010].

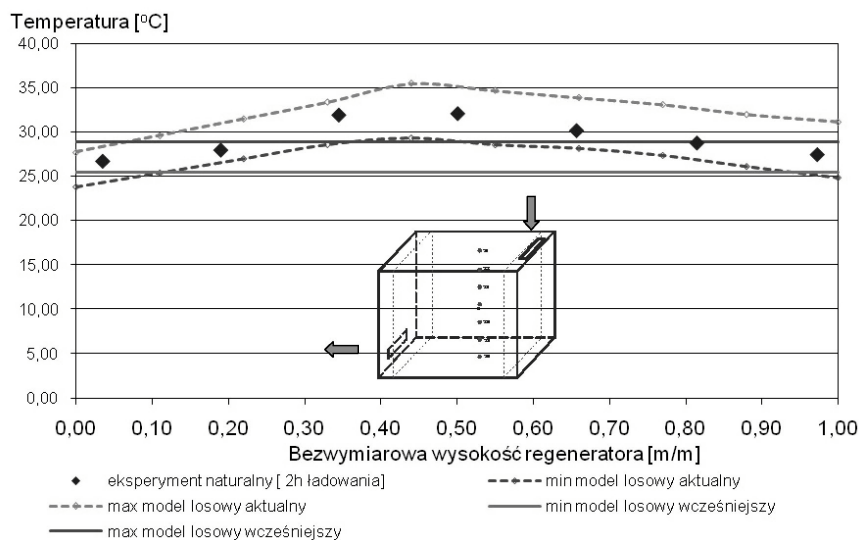
Rozwiązanie powyższego modelu matematycznego składającego się z $i*j$ niezależnych układów równań różniczkowych uzyskano dzięki zastosowaniu metody różnic skończonych.

Weryfikacja modelu

Ocena poprawności zaproponowanego modelu matematycznego wymagała porównania uzyskanych wyników symulacji z rezultatami przeprowadzonego eksperymentu naturalnego, jak i danymi dostarczonymi z wcześniejszego modelu. Efekty zgodności wyników przedstawiano graficznie na rysunku 1. Wykres zawiera krzywe obrazujące temperaturę powietrza, przepływającego przez regenerator wzdłuż osi, po 2 godzinach trwania procesu ładowania. Porównanie dotyczyło tylko temperatury powietrza, albowiem tylko ta wielkość, z wielkości bezpośrednio charakteryzujących proces ładowania, była mierzona w trakcie trwania eksperymentu naturalnego. Przeprowadzono go na akumulatorze pracującym w układzie poziomym wypełnionym tłuczeniem granitowym, a proces ładowania przebiegał przy stałej temperaturze powietrza wejściowego do złoża.



Rys. 1. Temperatury powietrza wzdłuż osi akumulator dla drugiej godziny ładowania uzyskane z modelu wcześniejszego, aktualnego i eksperymentu naturalnego
 Fig. 1. Air temperatures along the axis of the regenerator for the second hour of charging obtained from the previous model, present model and the natural experiment



Rys. 2. Rozkłady temperatury powietrza w akumulatorze w kierunku pionowym po dwóch godzinach ładowania uzyskane z modelu wcześniejszego, aktualnego i eksperymentu naturalnego
 Fig. 2. Air temperatures in the regenerator at height for the second hour of charging obtained from the previous model, present model and the natural experiment

Symulacja komputerowa zrealizowana z wykorzystaniem systemu informatycznego odwzorowującego nowy model [Mueller i in. 2010b] dostarczyła szersze spektrum danych, aniżeli wcześniejsze modele probabilistyczne wymiany ciepła. Wynika to z faktu uwzględnienia w nim nierównomierności przepływu powietrza przez złożę, co wymusiło podział akumulatora na sekcje również w płaszczyźnie YZ. Dało to podstawy do pełniejszej oceny przydatności zaproponowanego modelu. Efekty porównania temperatur powietrza otrzymanych z eksperymentu naturalnego i na bazie symulacji zaprezentowano na rys. 2. Wartości dyskretne temperatury powietrza otrzymane z pomiarów zawierają się z reguły pomiędzy wartościami maksymalnymi i minimalnymi, otrzymanymi z badań symulacyjnych nowego modelu. Odcinki równoległe do osi rzędnych na rysunkach reprezentują temperatury powietrza uzyskane na bazie wcześniejszego probabilistycznego modelu.

Identyfikacja cech losowych

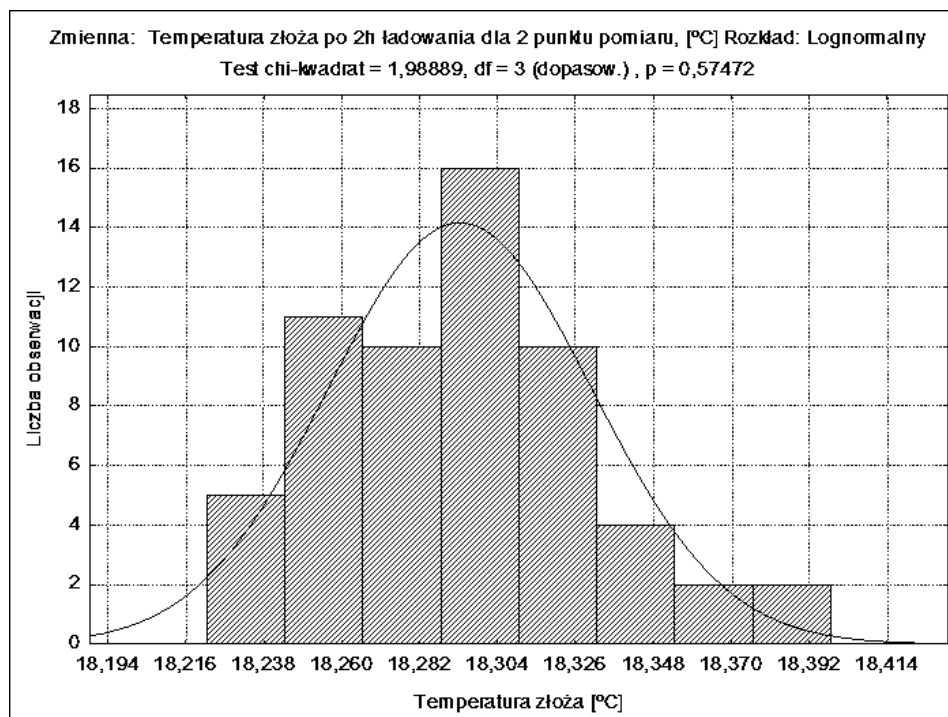
Pozytywna weryfikacja zaproponowanego probabilistycznego modelu wymiany ciepła, wyjaśniającego fazę ładowania kamiennego regeneratora, uczyniła zasadnym przeprowadzenie dalszych badań symulacyjnych, zmierzających do identyfikacji cech losowych wielkości fizycznych opisujących stan cieplny akumulatora. Osiągnięcie zamierzonego celu, oprócz realizacji symulacji komputerowych wymagało również przeprowadzenia odpowiedniej analizy statystycznej. Dane wejściowe dla wspomnianej analizy dostarczyły badania zrealizowane na wirtualnym złożu, w trakcie których wyznaczano temperaturę powietrza, złoża oraz określano ilość energii skumulowanej w akumulatorze. Przeprowadzono 60 eksperymentów, a uzyskane rezultaty zostały wyeksportowane do pakietu Statistica v. 7.0.

W dalszym poznawczym działaniu przyjęto równoległe dwie hipotezy, iż rozkład wspomnianych wielkości ma charakter normalny oraz lognormalny. Za tą decyzją przemawiał fakt, iż średnica równoważna kamieni, to zmienna losowa o rozkładzie lognormalnym [Benjamin, Cornell 1977], natomiast pozostałe wielkości, w tym wewnętrzna powierzchnia wymiany ciepła opisane są przez rozkład normalny. Efekty przeprowadzonych analiz statystycznych dla temperatury powietrza i złoża zostały zamieszczone w poniższej tabeli 1. i dodatkowo zilustrowano na rys. 3.

Tabela 1. Identyfikacja rozkładów charakteryzujących temperaturę powietrza i złoża
Table 1. Identification of the distribution characterising the temperature of air and bed

		Rozkład normalny			Rozkład lognormalny		
Nr punktu pomiarowego (współrzędne x,y,z)	Godzina ładowania	Test chi-kwadrat χ^2	Liczba stopni swobody	Poziom istotności α	Test chi-kwadrat χ^2	Liczba stopni swobody	Poziom istotności α
Temperatura powietrza ładującego regenerator							
3 (0,30; 0,30; 1,60)	2h	1,780	2	0,411	1,774	2	0,412
	4h	4,032	2	0,133	4,012	2	0,135
Temperatura złoża							
2 (0,60; 0,80, 1,10)	2h	1,999	3	0,573	1,989	3	0,575
	4h	6,956	6	0,325	6,98	6	0,323

Źródła : obliczenia własne autorów



Rys. 3. Histogram temperatury złoża po 2 godzinach ładowania dla drugiego punktu (0.60, 0.80, 1.10) wraz z dopasowanym rozkładem lognormalnym

Fig. 3. Histogram of the bed temperature after 2 hours of charging for the second point together with the fitted lognormal distribution

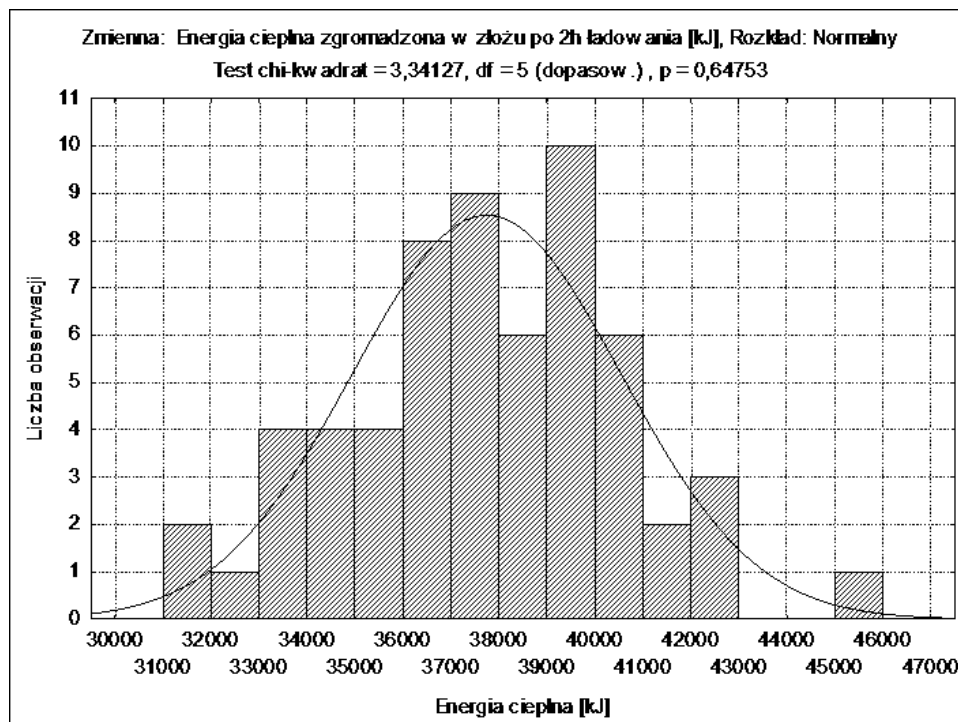
Podobny sposób postępowania zastosowano przy identyfikacji cech losowych ilości energii skumulowanej w złożu podczas fazy ładowania, czego efektem są uzyskane wyniki zaprezentowane w tabeli 2 oraz zilustrowane na wykresie rys. 4.

Tabela 2. Identyfikacja rozkładu charakteryzującego energię cieplną zgromadzoną w złożu

Table 2. Identification of the distribution characterising thermal energy accumulated in the bed

Godzina ładowania	Rozkład normalny			Rozkład lognormalny		
	Test chi-kwadrat χ^2	Liczba stopni swobody	Poziom istotności α	Test chi-kwadrat χ^2	Liczba stopni swobody	Poziom istotności α
Energia cieplna zgromadzona w regeneratorsze						
2h	3,341	5	0,648	3,885	4	0,422
4h	3,958	4	0,412	4,477	4	0,345

Źródła : obliczenia własne autorów



Rys. 4. Histogram energii cieplnej zgromadzonej w złożu po 2h godzinach ładowania wraz z dopasowanym rozkładem normalnym

Fig. 4. Histogram of thermal energy stored in the bed after 2 hours of charging together with the fitted normal distribution

Wnioski

1. Opracowany nowy probabilistyczny model wymiany ciepła, opisujący fazę ładowania kamiennego regeneratora, uwzględniający pełniej losową strukturę złoża oraz odwzorowujący nierównomierność przepływu powietrza, charakteryzuje się lepszym dopasowaniem wyników do danych doświadczalnych, w porównaniu do wcześniejszych modeli.
2. Przeprowadzone kompleksowe badania z wykorzystaniem symulacji komputerowych, zrealizowanych z zastosowaniem systemu informatycznego, implementującego nowy model, zmierzające do identyfikacji rozkładów charakteryzujących temperaturę powietrza i złoża, nie dały jednoznacznych odpowiedzi. Analiza statystyczna, obejmująca testowanie hipotez o prognozowanym rozkładzie normalnym lub lognormalnym temperatury powietrza oraz złoża w akumulatorze przy użyciu testu chi-kwadrat, nie daje podstaw (na poziomie istotności 0,05) do odrzucenia żadnej z nich.
3. Dane temperaturowe uzyskane z symulacji komputerowej fazy ładowania, zostały wykorzystane do określenia energii skumulowanej w złożu. Identyfikacja rozkładu energii

cieplnej, będącej zmienną losową, obejmująca testowanie hipotez o prognozowanym rozkładzie, w połączeniu z metodą największej wiarygodności wskazała, iż właściwym jest rozkład normalny, co pozostaje w zgodzie z centralnym twierdzeniem granicznym.

Bibliografia

- Benjamin J. R., Cormell C.** 1973. Rachunek prawdopodobieństwa statystyka matematyczna teoria decyzji dla inżynierów. Warszawa. WNT.
- Hollands K.G.T., Sullivan H.F., Shewen E.C.** 1984. Flow Uniformity in Rock Beds. *Solar Energy*. Nr 32(3) s. 343-348.
- Mueller W., Maćkowiak S., Siatkowski I.** 2010. Metodyka wyznaczania pola powierzchni elementów złoża stanowiących kamienny akumulator ciepła. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. Nr 55(2), s. 47-50.
- Mueller W., Maćkowiak S., Siatkowski I.** 2010. System informatyczny do symulacji przepływu ciepła w kamiennym regeneratorsze. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. Nr 55(2). s. 51-55.
- Mueller W., Kujawa S., Weres J.** 2003. Losowość temperatury w procesie ładowania kamiennego akumulatora energii cieplnej. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 12 (54). s. 249-257.
- Parker B.F., Bridges T.C., Walton L.R., Collivar D.G.** 1983. Design Equations for Particle Bed Heat Storages. *Transactions of the ASABE*. Nr. 26 (5) s. 1482-1485.

THE SIMULATION OF THE HEAT FLOW IN A STONE REGENERATOR WITH A RANDOMISED SUBSTRATE BED

Abstract. Because of their simple setup and the possibility of using the local deposits stone heat regenerators are dedicated to wider agriculture. The bed is often randomised due to economical factors. In the paper, another probabilistic mathematical model of the heat exchange has been presented. It takes into account to a greater extent the stochastic characteristic of the bed's structure and also it maps the irregular air flow going through the regenerator during the charging phase. Its positive verification initiated further simulation research leading to the identification of the properties of the random values describing the thermal state of the stone regenerator.

Key words: rock bed thermal storage, simulation research

Adres do korespondencji:

Wojciech Mueller; e-mail: muellerw@up.poznan.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 50
60-637 Poznań