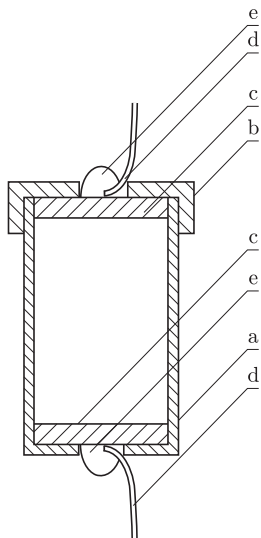


Wykrywamy próg perkolacji

Stanisław BEDNAREK

Słowo *perkolacja* oznaczało pierwotnie metodę wydobywania surowców chemicznych przez wypłukiwanie ich za pomocą rozpuszczalników. Obecnie teoria perkolacji stanowi matematyczną metodę opisu układów nieuporządkowanych, np. takich jak cząstki substancji przewodzącej rozproszone wewnątrz izolatora. Do naszego doświadczenia potrzebne będzie plastikowe cylindryczne pudełko o średnicy około 20 mm i wysokości około 40 mm. Bardzo dobrze nadaje się do tego celu pudełko od filmu. Oprócz tego potrzebne będą: suchy piasek, metalowe opiłki, przewody, bateria płaska i kawałki blaszki z puszki od konserw. Opiłki możemy uzyskać przez spiłowanie pilnikiem kawałka miękkiego metalu, np. aluminium lub miedzi albo wykorzystać stalowe opiłki używane w szkolnej pracowni fizycznej do badania linii pola magnetycznego. Ponadto niezbędny będzie również dostęp do lutownicy, miernika uniwersalnego i małej menzurki.



Rys. 1. Sposób wykonania elektrod;
a – pudełko od filmu,
b – pokrywka,
c – blaszka,
d – przewód,
e – cyna.

Na początku przygotowujemy płaskie elektrody. W tym celu na kawałkach blaszki rysujemy dwa okręgi o średnicy równej wewnętrznej średnicy pudełka. Ostrożnie, żeby się nie skaleczyć, wycinamy z blaszek dwa kółka. Do każdego z kółek przylutowujemy odizolowaną końcówkę przewodu połączeniowego. Oстрым końcem nożyczek wiercimy niewielkie otworki w środku dna oraz pokrywki pudełka. Przekładamy przewody przez wywiercone otworki, tak żeby elektrody znalazły się wewnątrz pudełka (rys. 1).

Pudełko napełniamy suchym piaskiem i zamykamy pokrywką. Końce przewodów łączymy z biegunami baterii oraz miernika uniwersalnego, tak żeby otrzymać obwód elektryczny, przedstawiony na rysunku 2. Pokrętło miernika ustawiamy na pomiar natężenia prądu w najmniejszym zakresie. Odczytujemy natężenie prądu płynącego przez obwód. Powinno ono wynosić zero, jeżeli tylko użyty piasek był dostatecznie suchy i czysty.

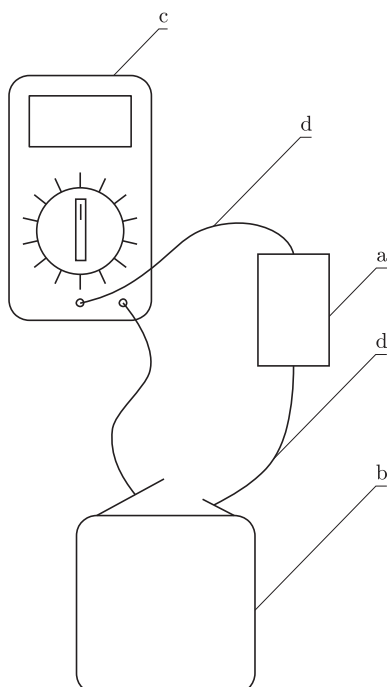
Nasze doświadczenie będzie polegało na pomiarach natężenia prądu elektrycznego, płynącego przez mieszaniny piasku z opiłkami metalowymi o zwiększającej się zawartości opiłków. W tym celu do menzurki wysypujemy niewielką ilość, np. 0,5 cm³ opiłków. Otwieramy pudełko i wysypujemy znajdujący się w nim piasek do menzurki. Górny koniec menzurki zamykamy kciukiem i potrząsamy wielokrotnie menzurką, tak żeby wytworzyć możliwie jak najbardziej jednorodną mieszaninę piasku z opiłkami. Na skali menzurki odczytujemy objętość otrzymanej mieszaniny. Mieszaninę przesypujemy do pudełka, potrząsamy nim i zamykamy pokrywką, a następnie przeprowadzamy pomiar natężenia płynącego przez nie prądu.

Jeżeli pewna ilość mieszaniny nie zmieści się do pudełka i pozostanie w menzurce, to nie należy się tym przejmować. W doświadczeniu będziemy brali pod uwagę względną zawartość opiłków w mieszaninie, która nie zależy od objętości mieszaniny znajdującej się w pudełku. Ta względna zawartość nazywa się współczynnikiem wypełnienia p_f i jest zdefiniowana następującym wzorem

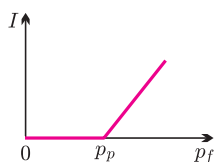
$$p_f = \frac{V_f}{V_m},$$

w którym V_f oznacza objętość opiłków, a V_m – objętość całkowitą mieszaniny.

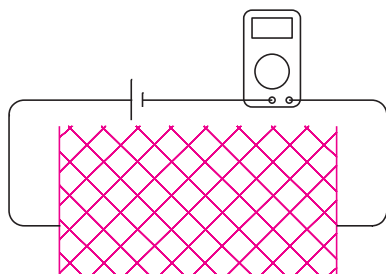
Jeżeli więc do wytworzenia mieszaniny użyliśmy np. 0,5 cm³ opiłków, a całkowita objętość mieszaniny wynosiła 20 cm³, to jej współczynnik wypełnienia p_f wynosi 0,025. Po przeprowadzeniu pomiaru natężenia prądu otwieramy pudełko i wysypujemy mieszaninę do menzurki. Do tej mieszaniny dosypujemy kolejną porcję opiłków, mierząc jej objętość, np. kolejne 0,5 cm³. Zamykamy otwór menzurki kciukiem i wielokrotnie potrząsamy menzurką w celu wytworzenia mieszaniny. Odczytujemy objętość całkowitą mieszaniny i obliczamy jej nowy współczynnik wypełnienia. Mieszaninę przesypujemy do pudełka, potrząsamy nim, zamykamy pokrywką i mierzymy natężenie przepływającego przez nią prądu elektrycznego.



Rys. 2. Obwód elektryczny do badania perkolacji;
a – pudełko od filmu napełnione mieszaniną piasku i opiłków metalowych,
b – bateria płaska,
c – miernik uniwersalny,
d – przewody.



Rys. 3. Zależność natężenia I prądu płynącego przez mieszaninę piasku i opilków metalowych od jej współczynnika p_f wypełnienia przez opilkę; p_p oznacza próg perkolacji.

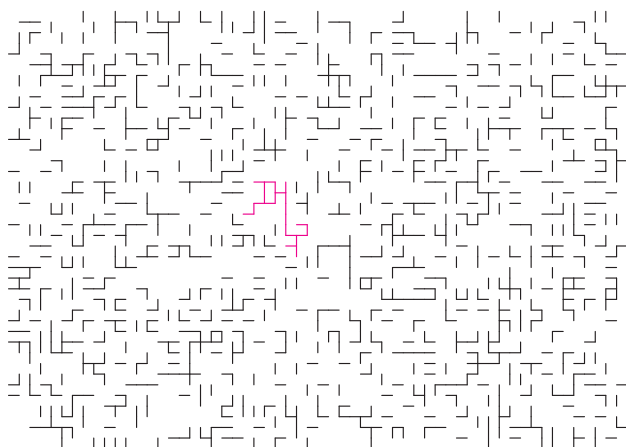


Rys. 4.

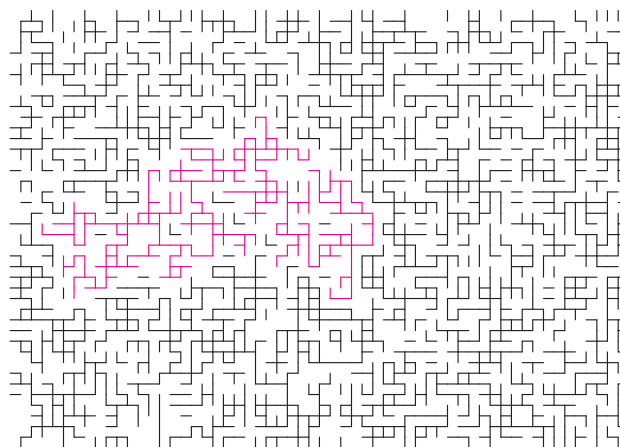
Opisane czynności powtarzamy kilkakrotnie, dochodząc do objętości opilków w mieszaninie wynoszącej np. 5 cm^3 . Rysujemy wykres, przedstawiający zależność natężenia I prądu płynącego przez mieszaninę od jej współczynnika wypełnienia p_f przez opilkę (rys. 3). Okazuje się, że mimo wzrostu współczynnika wypełnienia dla kilku początkowych mieszanin natężenie płynącego przez nie prądu wynosi zero. Poczynając od pewnej wartości współczynnika wypełnienia, natężenie prądu staje się większe od zera i rośnie liniowo ze wzrostem tego współczynnika. Wartość współczynnika wypełnienia, od której to następuje, nazywa się progiem perkolacji.

Na zakończenie warto dodać, że termin *perkolacja* został po raz pierwszy wprowadzony do opisu nieuporządkowanych struktur geometrycznych przez Hammersleya w 1957 r. Hammersley rozważał przepływ płynu przez sześciokątną sieć kanałów, w której losowo wybrana część jest zablokowana. Obecnie przy użyciu perkolacji rozpatruje się różne na pozór bardzo odległe od siebie zjawiska i procesy. Dla przykładu wymienimy tutaj przepływ cieczy w ośrodku porowatym, kompozyty materiałów przewodzących w matrycy izolacyjnej, żelowanie polimerów, wulkanizację, przewodnictwo poprzecinanej losowo siatki (rys. 4), czy rozprzestrzenianie się zaraźliwej choroby w populacji.

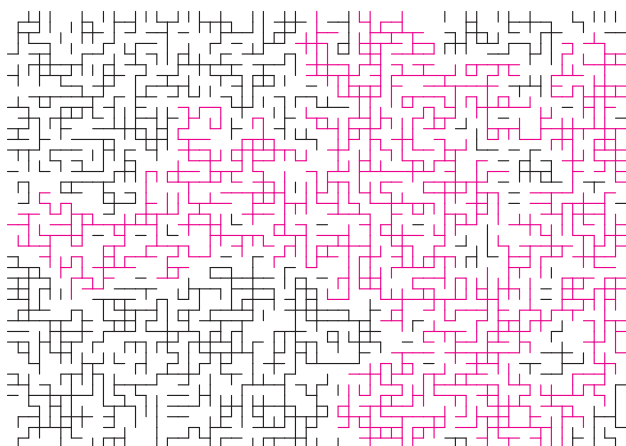
Rzut oka na perkolacje



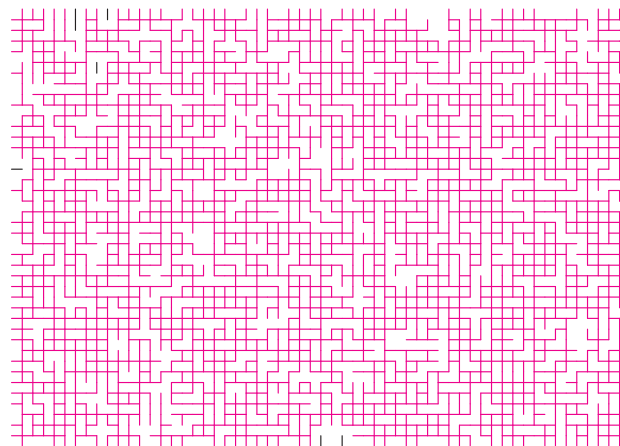
Rys. 1. $p = 0,25$



Rys. 2. $p = 0,49$



Rys. 3. $p = 0,51$



Rys. 4. $p = 0,75$

Fragmenty przykładowych podgrafów losowych kraty \mathbb{Z}^2 dla różnych wartości p . Na każdym rysunku jedna ze składowych została wyróżniona kolorem. Więcej o teorii perkolacji na następnej stronie.