



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ CHEMICZNY

LABORATORIUM ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII
Katedra Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego
Wydział Chemiczny Politechniki Gdańskiej

INSTRUKCJA LABORATORYJNA NR 8-OS a

CHARAKTERYSTYKA OGNIW SŁONECZNYCH



1. Cel i zakres ćwiczenia

Ćwiczenie ma na celu zapoznanie studentów z następującymi zagadnieniami:

- Pomiar charakterystyki natężeniowo-napięciowej ogniw fotowoltaicznych.
- Obliczanie parametrów elektrycznych ogniw fotowoltaicznych w warunkach stałego oświetlenia.
- Szeregowe i równoległe połączenie ogniw fotowoltaicznych.

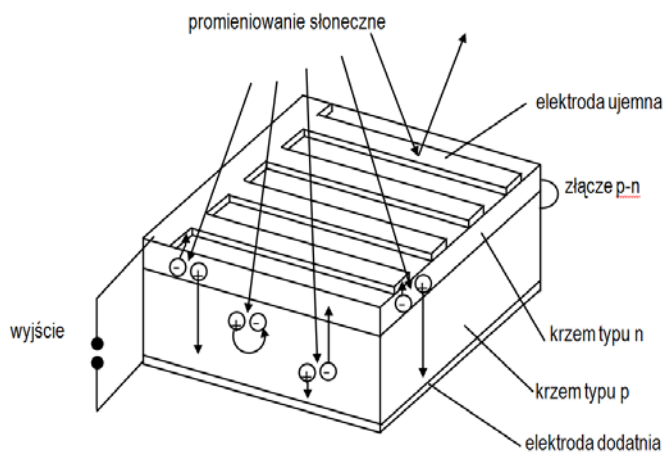
2. Tematyka ćwiczenia

Podstawowym elementem systemu fotowoltaicznego jest ogniwo słoneczne (fotowoltaiczne). Wystawione na działanie promieni słonecznych, jest ono źródłem napięcia stałego.

Ogniwa są grupowane i łączone ze sobą, tworząc moduły fotowoltaiczne.

Ogniwo fotowoltaiczne składa się zasadniczo z następujących elementów:

- płytki krzemowej mono lub polikrystalicznej, w której wytworzono złącze p-n,
- kontaktów (elektrody przedniej i tylnej, przy czym przednia elektroda powinna być tak ukształtowana, aby jak najwięcej promieniowania padającego mogło dotrzeć do obszaru złącza, którego głębokość ograniczona jest możliwością przenikania promieniowania w głąb krzemu),
- pokrywającej przednią powierzchnię ogniwa warstwy antyodblaskowej.



Zasadę konwersji fotowoltaicznej ilustruje Rysunek 1.

Absorpcja światła w półprzewodnikach zachodzi przez uwalnianie elektronów z wiązań chemicznych międzyatomowych. W celu wytworzenia swobodnego elektronu w danym materiale półprzewodnikowym należy porcję energii co najmniej równą energii przerwy energetycznej E_g (dla krzemu w temperaturze 300 K $E_g = 1,12\text{eV}$). Uwolniony elektron pozostawia za sobą dziurę, która posiadając ładunek dodatni

może poruszać się (przez dyfuzję lub pod wpływem pola elektrycznego).

Rys. 1. Schemat konwersji fotowoltaicznej w krzemowym ogniwie słonecznym (skala niezachowana)

Jeżeli z obszarów półprzewodnika typu p i typu n utworzy się złącze p-n, na granicy obu obszarów w momencie ich połączenia będzie istniał bardzo duży gradient koncentracji elektronów i dziur. Ten gradient powoduje dyfuzję elektronów z obszaru n do p oraz dziur z obszaru p do n. W rezultacie tej dyfuzji w pobliżu linii złącza utworzy się ładunek przestrzenny: po stronie obszaru n ładunek dodatni, gdyż z tego obszaru elektrony odpłynęły, a pozostały nieskompensowane dodatnie ładunki nieruchomych jonów donorowych oraz przybyły do tego obszaru dodatnie dziury z obszaru p, a po stronie obszaru p ładunek ujemny, gdyż w podobny sposób przez dyfuzję nośników utworzony tu został obszar ujemnego ładunku nieruchomych jonów akceptorowych oraz przybyłych do tego obszaru ujemnych elektronów z obszaru n. W ten sposób w obszarze złącza p-n powstaje warstwa ładunku objętościowego (dipolowa warstwa ładunku przestrzennego). W warstwie tej powstaje bariera potencjału i pole elektryczne skierowane od obszaru n do obszaru p, które przeciwdziała dalszemu procesowi dyfuzji i ogranicza prąd dyfuzyjny do pewnej wartości. Oprócz nośników większościowych istnieją w obydwu obszarach złącza nośniki mniejszościowe, powstające w rezultacie generacji termicznej par elektron-dziura. Wytworzona w wyniku dyfuzji nośników większościowych bariera potencjału sprzyja odpływowi nośników mniejszościowych z obydwu obszarów. Ruch tych nośników stanowi prąd ciemny, przeciwnie skierowany do prądu dyfuzyjnego.

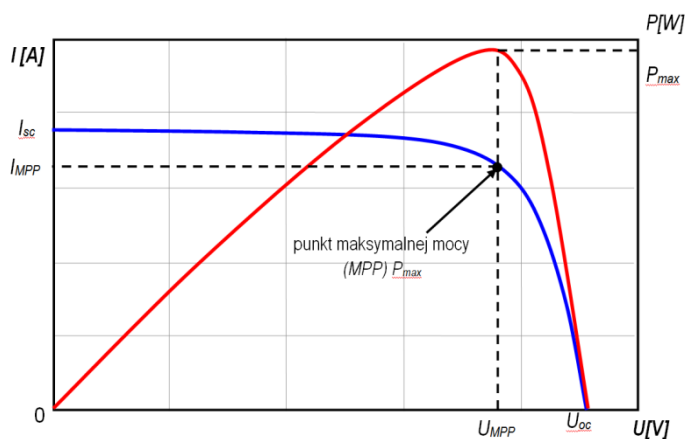
Jeżeli złącze p-n zostanie oświetlone fotonami o energii równej lub większej od szerokości przerwy energetycznej E_g , to powstaną po obydwu stronach złącza pary elektron-dziura, podobnie jak przy generacji termicznej. Nośniki powstające w odległości nie większej od bariery potencjału niż droga dyfuzji¹ nośników mniejszościowych, będą dochodzić do bariery potencjału ruchem dyfuzyjnym i zostaną rozdzielone przez pole elektryczne, związane z obecnością złącza. Pole to przesuwka każdy z nośników w przeciwnym kierunku – elektrony do obszaru n, a dziury do obszaru p. Takie rozdzielanie ładunku powoduje powstanie różnicy potencjałów U w poprzek złącza. Dzięki temu, dla obwodu zamkniętego powstanie prąd fotoelektryczny I o tym samym kierunku co prąd I_{s0} i podobnie jak I_{s0} niezależny od wysokości bariery potencjału.

Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa/modułu PV jest to wykres natężenia prądu wyjściowego generatora fotowoltaicznego w funkcji napięcia w określonej temperaturze i natężeniu promieniowania.

Charakterystyczne punkty krzywej $I(U)$ zaznaczono na Rysunku 2:

1. napięcie otwartego obwodu (U_{oc}) – napięcie na końcówkach nieobciążonego (otwartego) generatora fotowoltaicznego w określonej temperaturze i natężeniu promieniowania,
2. prąd zwarcia (I_{sc}) – natężenie prądu wyjściowego generatora fotowoltaicznego w warunkach zwarcia w określonej temperaturze i przy określonym natężeniu promieniowania,
3. natężenie prądu w punkcie mocy maksymalnej I_{MPP}
4. napięcie w punkcie mocy maksymalnej U_{MPP}
5. współczynnik wypełnienia charakterystyki prądowo-napięciowej FF (ang.: *Fill Factor*).

Rzeczywista krzywa charakterystyki można być zmierzona poprzez zmianę natężenia w przyłączonym obwodzie za pomocą zmiennego opornika omowego.



Dla każdej pary wartości U , $I(U)$ krzywej charakterystyki, moc elektryczna może zostać określona zgodnie jako iloczyn $P = UI$. MPP (maksymalny punkt mocy) zostaje osiągnięty, gdy moc P (czerwona krzywa) osiągnie wartość maksymalną: $P_{MPP} = U_{MPP} I_{MPP}$.

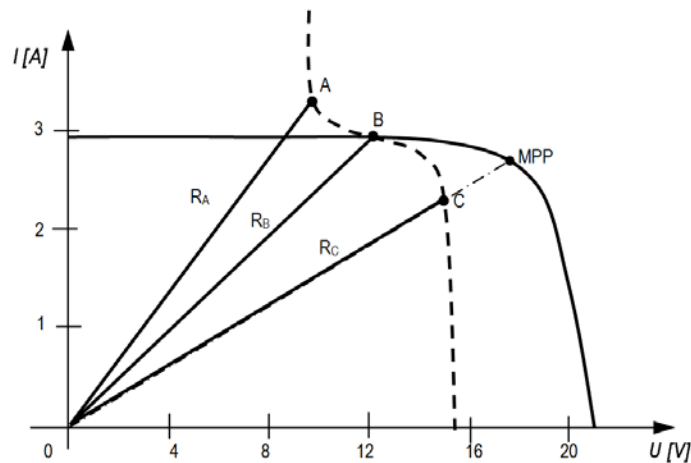
FF - to parametr, określający jakość ogniwa/modułu fotowoltaicznego: $FF = P_{MPP} / (U_{oc} I_{sc})$.

Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa oraz moc w funkcji napięcia

Para wartości I oraz U skojarzona z punktem pracy ogniwa słonecznego może zostać określona graficznie. W tym celu linia obciążenia danego odbiornika oporowego została naniesiona na wykres $I(U)$. Punkt pracy znajduje się na przecięciu linii obciążenia oraz krzywej charakterystyki ogniwa.

¹Droga dyfuzji – średnia odległość, na jaką muszą przemieścić się nośniki mniejszościowe, zanim nie zrekombinują z nośnikami większościowymi.

Optymalny opór obciążenia (na Rys. 3. jest to R_C) wyznacza punkt mocy maksymalnej: $R_{opt} = U_{MPP}/I_{MPP}$.



Rys. 3. Charakterystyka prądowo-napięciowa modułu PV i charakterystyka obciążenia dla trzech różnych obciążeń A, B i C

Zestaw eksperymentów do wykonania w ramach ćwiczenia:

- A. Pomiar krzywej $I-U$, optymalny punkt pracy ogniwa, wyznaczenie mocy maksymalnej, sprawności konwersji i współczynnika wypełnienia charakterystyki
- B. Łączenie ogniw, maksymalna wartość natężenia, napięcia i mocy układu ogniw słonecznych połączonych równolegle/ szeregowo

3. Opis stanowiska

Natężenie oświetlenia, temperatura i obciążenie elektryczne mają bezpośredni wpływ na parametry elektryczne pracy ogniw fotowoltaicznych.

Układ oświetleniowy z regulowanym natężeniem oświetla cztery ogniwa słoneczne, których temperaturę można utrzymywać na stałym poziomie dzięki modułowi Peltiera.

Zastosowanie dołączonego zestawu kabli umożliwia połączenie ogniw szeregowo lub/i równolegle za pomocą tablicy połączeń. Opornik elektryczny o zmiennym obciążeniu, wbudowany w tablicę połączeń umożliwia ręczne obliczenia na podstawie zmierzonej krzywej charakterystyki prądowo-napięciowej. Do każdego ogniwa można przyłączyć równolegle diodę w celu zbadania wpływu zacinienia.

Pomiary krzywej charakterystyki można wykonać automatycznie przy pomocy wbudowanego układu odpływu prądu sterowanego oprogramowaniem i pozwalającego na ciągłe zmiany obciążenia elektrycznego. Do pomiaru natężenia oświetlenia, natężenia prądu, napięcia elektrycznego i temperatury służy układ czujników wraz z oprogramowaniem.

3A. Oświetlenie

Jednostka oświetleniowa zawiera 16 pojedynczych lamp halogenowych do oświetlania ogniw słonecznych. Oświetlenie można regulować za pomocą oprogramowania, wprowadzając określoną wartość wyrażoną w $[W/m^2]$. Po wprowadzeniu wartości należy wyregulować natężenie lampy przy pomocy źródła zasilania jednostki oświetleniowej do momentu osiągnięcia pożądanego oświetlenia. Natężenie oświetlenia jest regulowane w zakresie $200 W/m^2$ - $800 W/m^2$. Jeśli uzyskanie wybranej wartości jest niemożliwe, wyświetlony zostanie komunikat o błędzie.

3B. Ogniwa słoneczne

W układzie ogniw słonecznych znajdują się cztery monokrystaliczne ogniwa. Przód i tył ogniw słonecznych zostały połączone za pomocą powlekanej cyną taśmy miedzianej. Ze styków ogniw słonecznych poprowadzono kable do gniazd tablicy połączeń.

Referencyjne ogniwo słoneczne zamontowano pomiędzy ogniwami. Jego zadaniem jest pomiar natężenia oświetlenia. Wartość mierzona steruje natężeniem lampy.

Przewodząca ciepło podstawa montażowa zapewnia przewodnictwo cieplne pomiędzy ogniwami słonecznymi a zamocowanym poniżej modułem chłodniczym/grzewczym Peltiera, który służy do chłodzenia lub podgrzewania ogniw słonecznych w zależności od zadanej temperatury.

3C. Tablica połączeń

Tablica połączeniowa umożliwia wykonanie różnych połączeń elektrycznych przy użyciu dołączonych kabli. W celu utworzenia połączeń elektrycznych dostępne są kable czerwone i niebieskie o dwóch różnych długościach, jak również wtyczki zwarciove.

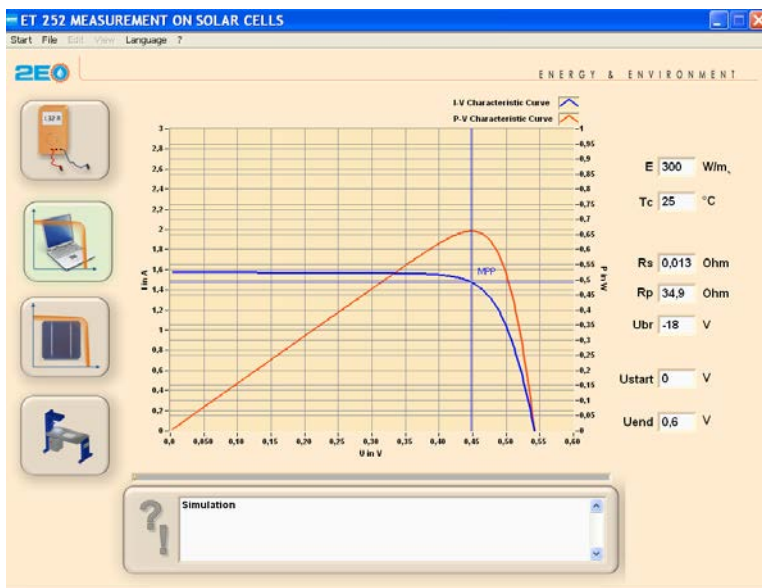
W każdym ogniwie ze styków przednich i tylnych poprowadzono kable do gniazd tablicy połączeniowej.

3D. Jednostka pomiarowa i sterownicza z automatycznym odpływem prądu

Skrzynka rozdzielcza zawiera wszystkie główne komponenty do sterowania i pobierania danych. Podczas pracy nie ma potrzeby jej otwierania.

Wykonanie pomiarów możliwe jedynie po podłączeniu poprzez złącze USB komputera, na którym zainstalowano odpowiednie oprogramowanie. Z przodu skrzynki rozdzielczej znajduje się przełącznik główny jednostki oraz przełączniki jednostki oświetleniowej i modułu Peltiera, które można włączyć tylko raz po uruchomieniu oprogramowania, które służy do sterowania wszystkimi funkcjami urządzenia.

3E. Oprogramowanie



Oprogramowanie pozwala na odczyt wyników i obserwację wykresów oraz prowadzenie symulacji. Ikony, którymi przełączamy funkcje programowe:

-  **Multimetr** - wartości mierzone
-  **Symulacja**
-  **Wykres charakterystyki I-U i P-U**
-  **Przycisk** aktywujący moduł szkoleniowy

4. Przebieg ćwiczenia

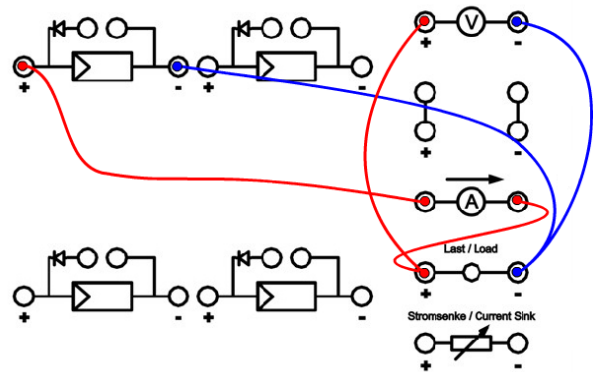
- A. Pomiar krzywej $I-U$, optymalny punkt pracy ogniwa, wyznaczenie mocy maksymalnej, sprawności konwersji i współczynnika wypełnienia charakterystyki

Nacisnąć przycisk aktywujący moduł szkoleniowy. Nacisnąć strzałkę na module szkoleniowym, aż do momentu pokazania się animacji.

A1. Przyłączyć kable zgodnie z rysunkiem/animacją (natężenie mierzone jest w połączeniu szeregowym, a napięcie w połączeniu równoległym).

Po kliknięciu strzałki (w prawym dolnym rogu), pojawia się widok multimetru. W tym miejscu wyświetlane są: natężenie i napięcie.

A2. Uruchomić oświetlenie i moduł Peltiera przełącznikiem na skrzynce rozdzielczej urządzenia. W polu danych oprogramowania ET252 wprowadzić dla oświetlenia wartość 300 W/m^2 .



Aktywacja następuje po kliknięciu w dowolnym miejscu obszaru programu lub po naciśnięciu przycisku ENTER na klawiaturze komputera.

A3. Powoli przekręcić do oporu potencjometr na tablicy połączeń przeciwnie do kierunku wskazówek zegara i obserwować zmiany natężenie i napięcia na ekranie oprogramowania ET252.

Zanotować natężenie i napięcie oświetlanego ogniwa (wykonać pięć pomiarów: dla napięcia pomiędzy $0,1$ a $0,52 \text{ V}$).

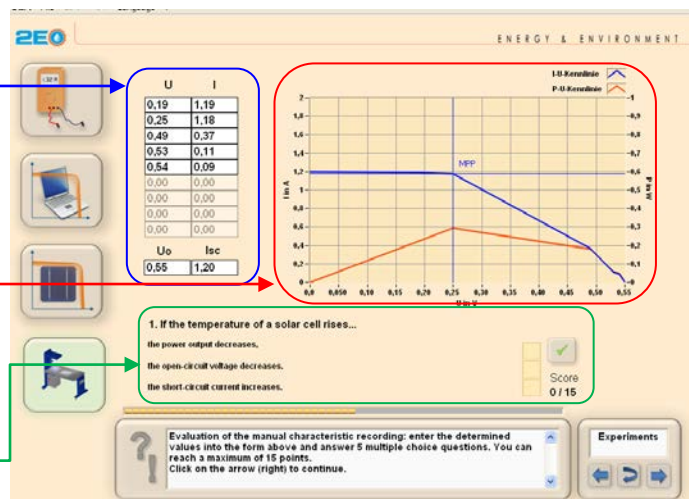
A4. Zmierzyć natężenie prądu zwarcia poprzez bezpośrednie podłączenie ogniwa do amperomierza i napięcie otwartego obwodu poprzez bezpośrednie podłączenie ogniwa do woltomierza.

acisnąć strzałkę na module szkoleniowym, aż do momentu pokazania się tabeli.

A5. Wprowadzić wyniki pomiarów do tabeli pokazanej w oprogramowaniu ET 252.

Wyniki wyświetlone zostają bezpośrednio na wykresie, umożliwiając śledzenie procesu powstawania pełnej krzywej charakterystyki $I-U$ *. Czerwona krzywa reprezentuje moc elektryczną ogniwa słonecznego (oś y po prawej stronie). Punkt mocy maksymalnej zostaje osiągnięty (MPP) najwyższym punkcie czerwonej krzywej.

A6. Odpowiedzieć na 5 pytań wielokrotnego wyboru, które zostaną po chwili wyświetlone. Można zdobyć maksymalnie 15 punktów.



*Uwaga: dostosować wartości maksymalne na osiach wykresu do wartości mierzonych.

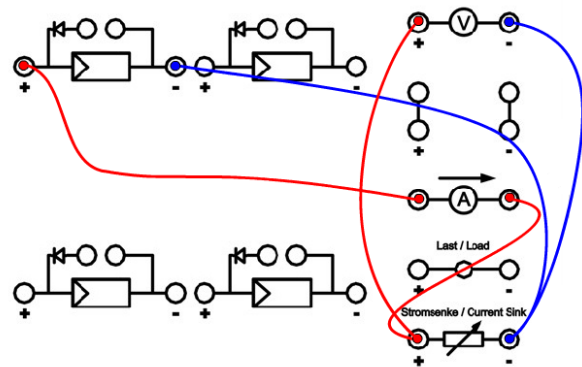
A7. Wyznaczyć wartości: P_{MPP} , $\eta = P_{MPP}/(E \cdot S)$, $R_{opt} = U_{MPP}/I_{MPP}$, $FF = P_{MPP}/(U_{oc} \cdot I_{sc})$.

A'. Automatyczny pomiar krzywej $I-U$

Nacisnąć strzałkę na module szkoleniowym i przejść do następnego ćwiczenia. Nacisnąć strzałkę na module szkoleniowym, aż do momentu pokazania się animacji.

A'1. Podłączyć kable zgodnie z animacją/rysunkiem.

Natężenie mierzone jest w połączeniu szeregowym w kierunku ogniwa i odbiornika, zaś napięcie w połączeniu równoległym.



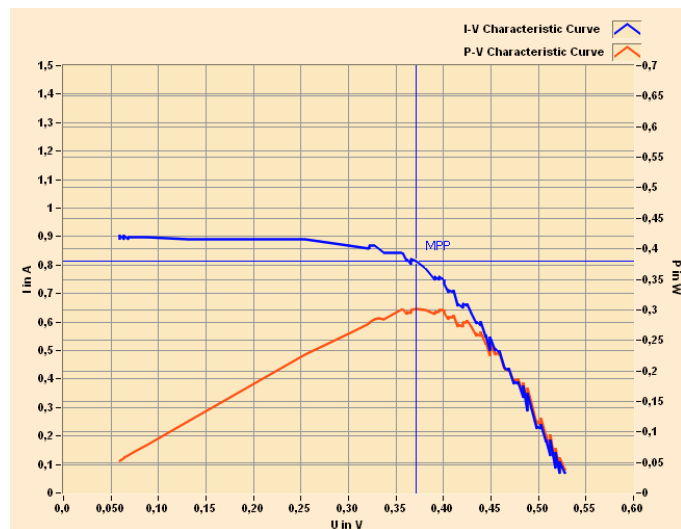
Zamiast potencjometru należy użyć gniazda układu odpływu prądu.

A'2. Zastosowanie oprogramowania

Po naciśnięciu strzałki w podglądzie multimetru temperaturę określić na 25°C i oświetlenie ogniwa nastawić na 300 W/m^2 .

A'3. Po naciśnięciu strzałki po chwili pojawi się podgląd krzywej charakterystyki $I-U$. Następnie następuje odnotowanie krzywej charakterystyki poprzez regulację natężenia w krótkich odstępach czasu.

Elementy sterownicze temperatury i oświetlenia umieszczone są po prawej stronie.



Zmienić wartości natężenia oświetlenia by zaobserwować zmiany w przebiegu charakterystyki.

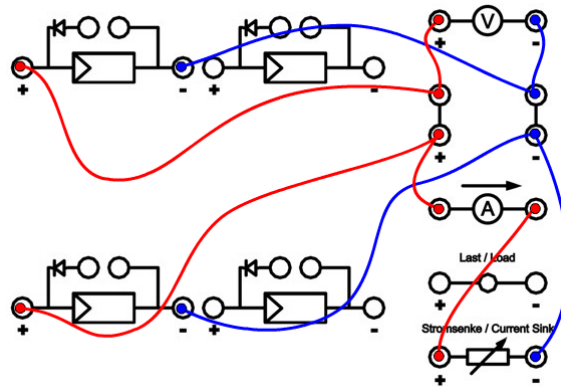
B. Łączenie ogniw, maksymalna wartość natężenia, napięcia i mocy układu ogniw słonecznych połączonych równolegle/ szeregowo

Nacisnąć strzałkę na module szkoleniowym aż do momentu pojawienia się animacji.

B1. Wyznaczanie krzywej charakterystyki prądowo-napięciowej dla dwóch ogniw słonecznych połączonych równolegle.
Wykonać wszystkie połączenia zgodnie z rysunkiem.

Wykres krzywej charakterystyki obserwujemy po naciśnięciu ikony **Wykres Charakterystyki** (3 od góry).

Wybrać oświetlenie 300 W/m^2 i temperaturę 25°C .



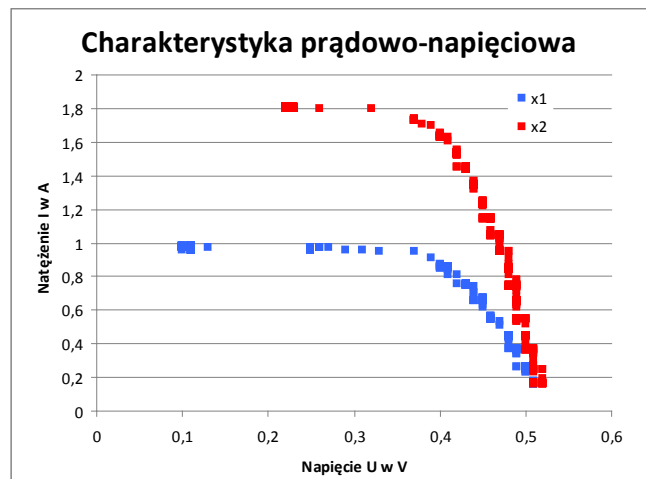
Obserwować krzywą charakterystyki natężeniowo-napięciowej i zapisać dane w pliku odpowiedniej nazwie (file → save graph) np. IU_rowno_2.dat.

Rozłączyć połączenie kablowe z jednym z dwóch ogniw słonecznych i zanotować bieżącą krzywą charakterystyki w pliku o innej nazwie np. IU_rowno_1.dat.

Po zakończeniu pomiaru automatycznego należy w trybie manualnym zmierzyć U_{oc} i I_{sc} (zgodnie z pkt. A4).

Otrzymane wyniki należy skopiować po zakończeniu ćwiczeń z pliku dat do programu EXEL i stworzyć wykres punktowy przedstawiający krzywe charakterystyki prądowo-napięciowej.

Krzywe charakterystyki natężeniowo-napięciowej dla jednego i dwóch ogniw słonecznych połączonych równolegle przedstawia rysunek.



Analizując wyniki obliczyć moc maksymalną i współczynnik wypełnienia charakterystyki dla jednego ogniwa i dwóch ogniw, połączonych równolegle.

	1 ogniwo	2 ogniwa
Napięcie otwartego obwodu [V]	0,53	0,53
Natężenie prądu zwarcia [A]	0,91	1,8
Maksymalna moc [W]	0,36	0,65
Współczynnik wypełnienia [%]	75	68

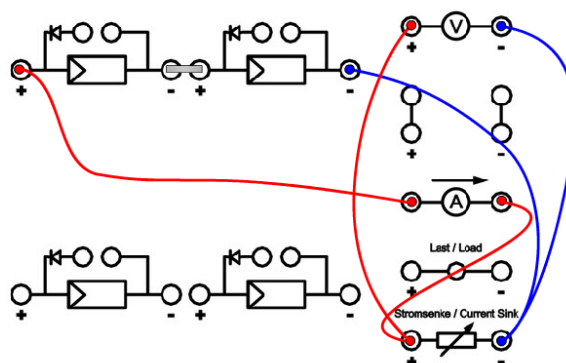
Wnioski: przy połączeniu równoległym, natężenia i moc elektryczna ogniw sumują się, zaś napięcie i współczynnik wypełnienia pozostają bez zmian.

B2. Wyznaczanie krzywej charakterystyki prądowo-napięciowej dla dwóch ogniw słonecznych połączonych szeregowo.

Nacisnąć strzałkę na module szkoleniowym i przejść do następnego ćwiczenia.

Wykonać wszystkie połączenia zgodnie z rysunkiem.

Obserwować krzywą charakterystyki natężeniowo-napięciowej po naciśnięciu ikony **Wykres Charakterystyki** (3 od góry), i zapisać dane w pliku odpowiedniej nazwie (file → save graph) np. IU_szereg_2.dat.



Powtórzyć pomiary tylko dla jednego ogniw oraz dla 3 i 4 ogniw połączonych szeregowo.

Wszystkie dane zapisywać w pliku dat.

Po zakończeniu pomiaru automatycznego należy w trybie manualnym zmierzyć U_{oc} i I_{sc} (zgodnie z pkt. A4).

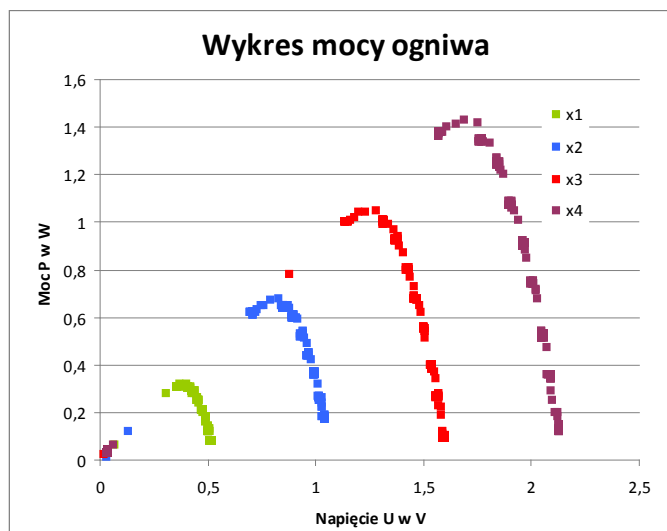
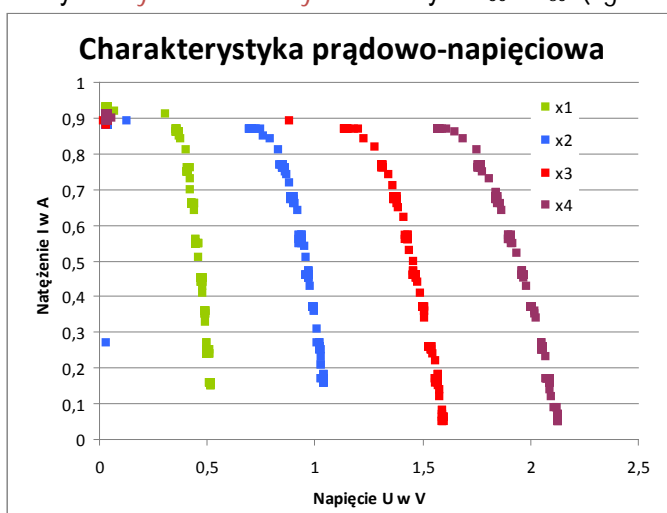
Otrzymane wyniki należy skopiować po zakończeniu ćwiczeń z pliku dat do programu EXEL i stworzyć wykres punktowy przedstawiający krzywe charakterystyki prądowo-napięciowej.

Krzywe charakterystyki natężeniowo-napięciowej dla jednego i 2-4 ogniw słonecznych połączonych szeregowo przedstawia rysunek.

Można zauważyć, że napięcia otwartego obwodu ogniw połączonych szeregowo sumują się, zaś natężenie pozostaje stałe.

Rysunek przedstawia wyniki pomiarów dla mocy elektrycznej P w funkcji napięcia w 4 pomiarach. Można zauważyć, że moc rośnie wraz z liczbą połączonych ogniw. Odpowiadające napięcie także przesuwają się w stronę wyższych wartości.

Analizując wyniki obliczyć moc maksymalną i współczynnik wypełnienia charakterystyki dla jednego ogniw i 2-4 ogniw połączonych szeregowo. Sformułować wnioski.



	1 ogniwo	2 ogniwa	3 ogniwa	4 ogniwa
Napięcie otwartego obwodu [V]	0,53	1,04	1,55	2,04
Natężenie prądu zwarcia [A]	0,91	0,91	0,91	0,91
Maksymalna moc [W]	0,31	0,67	1,05	1,41
Współczynnik wypełnienia [%]	64	71	74	76

5. Literatura

- [1] Ewa Klugmann-Radziemska, Fotowoltaika w teorii i Praktyce, Wydawnictwo BTC, Warszawa-Legionowo 2009
- [2] Ewa Klugmann-Radziemska, Odnawialne źródła energii - przykłady obliczeniowe, Wydanie V, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2015
- [3] ET 252 Pomiary na ogniwach słonecznych, G.U.N.T. Gerätebau, Barsbüttel, Germany 2015