Jak podtrzymać życie w kosmosie?

Robert Hubacz

e-mail: r.hubacz@ichip.pw.edu.pl
telefon:22 234 64 94
adres:ul. Waryńskiego 1, 00-645 Warszaw

Podstawowe funkcje systemów podtrzymywania życia

Dostarczanie substancji konsumowanych przez załogę	żywności; tlenu; wody (pitnej oraz do innych celów)
Usuwanie i recyrkulacja odpadów	dwutlenku węgla; zużytej wody; moczu oraz odpadów stałych
utrzymanie odpowiedniej atmosfery w kabinie	dostarczanie gazu obojętnego; usuwanie zanieczyszczeń śladowych; utrzymanie odpowiedniego ciśnienia, temperatury i wilgotności; wykrywanie i gaszenie pożarów
Utrzymanie odpowiedniej grawitacji	
Ochrona przed zderzeniem z jakimś obiektem	
Ochrona przed promieniowaniem jonizującym	

Wprowadzenie

Łódź podwodna:
grawitacja ziemska, łatwy dostęp do zasobów, wyrzucanie np. gazu na zewnątrz może zdradzić pozycje statku

Skafander kosmiczny:
stan nieważkości, obniżone ciśnienie atmosfery

Statek kosmiczny:
stan nieważkości, utrudniony dostęp do zasobów, wyrzucanie odpadów na zewnątrz nie wpływa bezpośrednio na środowisko wewnątrz statku

Stacja kosmiczna na obcej planecie:
inna grawitacja niż na Ziemi; dostęp do zasobów zależy od warunków na planecie

Planeta:
Przykłady Ziemia lub Mars

Co się dzieje, gdy grawitacja przestaje działać?

Gdy nie ma grawitacji (zero-g) to obserwuje się następujące zjawiska:

* Nie ma ciężaru ($F = m \cdot g = 0$)
* Brak ciśnienia hydrostatycznego
* Brak siły wyporu
* Brak sedymentacji
* Brak konwekcji swobodnej

Wartość *g* wpływa znacznie na:

* ciężar ($F = m \cdot g$)
- kształt i stabilność powierzchni międzyfazowej,
- ciśnienie hydrostatyczne
* siłę wyporu
- przepływ dwufazowe (np. sedymentacje, gaz-ciecz)
- konwekcję swobodną,

Wartość *g* nie wpływa na właściwości płynów:

* napięcie powierzchniowe,
* kąt zwilżania,
* gęstość płynu,
* współczynnik dyfuzji,
* lepkość płynu

Mikrograwitacja

Warunki na platformie kosmicznej (np. statku, satelicie) wynikają z bilansu siły grawitacji i siły bezwładności działającej na tą platformę

$$g = g_z - a = g_R + g(t) \neq 0$$

* **Szczątkowe przyspieszenie grawitacyjne (residual-g) o stałej lub prawie stałej wartości wynikające z działania np.: oporów aerodynamicznych; ciśnienia promieniowania słonecznego; siły odśrodkowej.**

* **Okresowo zmienne przyspieszenie (*g-jitter*)-$10^{-6} < g/g_o < 10^{-2}$; 0,1 Hz < f < 300 Hz (np. praca urządzeń na pokładzie, aktywność załogi).**

$$g(t) = \sum g_i \sin(\omega_i t)$$

* **Przyspieszenie o charakterze impulsu (np. dokowania / cumowania, odpalanie silników, zderzenie z jakimś obiektem).**

na podstawie: Monti R.: Physics of fluids In microgravity, Taylor and Francis 2001

Mars

średnica	min/max temperatura	dzień	rok	grawitacja	ciśnienie w atmosferze	atmosfera
6754.8 km	133K/293K	24 godziny i 40 min	686.98 dni	38% grawitacji ziemskiej	0.7-0.9 kPa	0 .13% O_2 95.32% CO_2

Księżyc

średnica	min/max temperatura	dzień	grawitacja	ciśnienie w atmosferze	atmosfera
3472.0 km	40K/396K	około 14 ziemskich dni	16.54% grawitacji ziemskiej	3×10^{-13} kPa	He 25%, Ne 25% H 23%, Ar 20%

Planetoidy

Potencjalne źródła materiałów do konstrukcji, wody, paliw rakietowych itp.

Masa systemu

Im większa masa tym większe koszty transportu na orbitę około ziemską

Niezawodność systemu

Misja na Międzynarodową Stację Kosmiczną – czas trwania 10 dni
Misja na Marsa – czas trwania 1000 dni

Niezawodność		
1 dzień	10 dni	1000 dni
0.999	0.99	0.37
0.99999	0.9999	0.99

Można to osiągnąć przez:
*podwojenie masy sytemu (zabranie części zapasowych dla każdego elementu systemu)
*długotrwałe cykliczne testy sytemu

Na podstawie: Jones and Kliss. Advance in Space research 45 (2010), 917-928

Sposoby dostarczenia niezbędnych materiałów do podtrzymania życia:

-Zabranie wszystkiego w momencie startu

-Uzupełnianie zużytych zasobów w trakcie trwania misji

-Odzyskiwanie i ponowne użycie potrzebnych materiałów w czasie lotu

-Wykorzystanie materiałów dostępnych w pobliży stacji kosmicznej np. na innej planecie

Rodzaje systemów podtrzymywania życia

* **System otwarty**, w którym wszystkie potrzebne substancje dostarcza się z powierzchni Ziemi, a odpady nie stanowią źródła użytecznych substancji.

* **Systemy regeneracyjne**, w których odpady traktuje się jako źródła użytecznych substancji:

a) oparte na metodach fizyko-chemicznych,
b) systemy hybrydowe, w których wykorzystuje się zarówno metody fizyko-chemiczne jak i biologiczne.
c) oparte na metodach biologicznych,

Nawet w systemach regeneracyjnych część potrzebnych substancji będzie trzeba dostarczyć z zewnątrz (np. Ziemi)

Współczynnik równoważności masy systemu

Equivalent system mass (ESM)

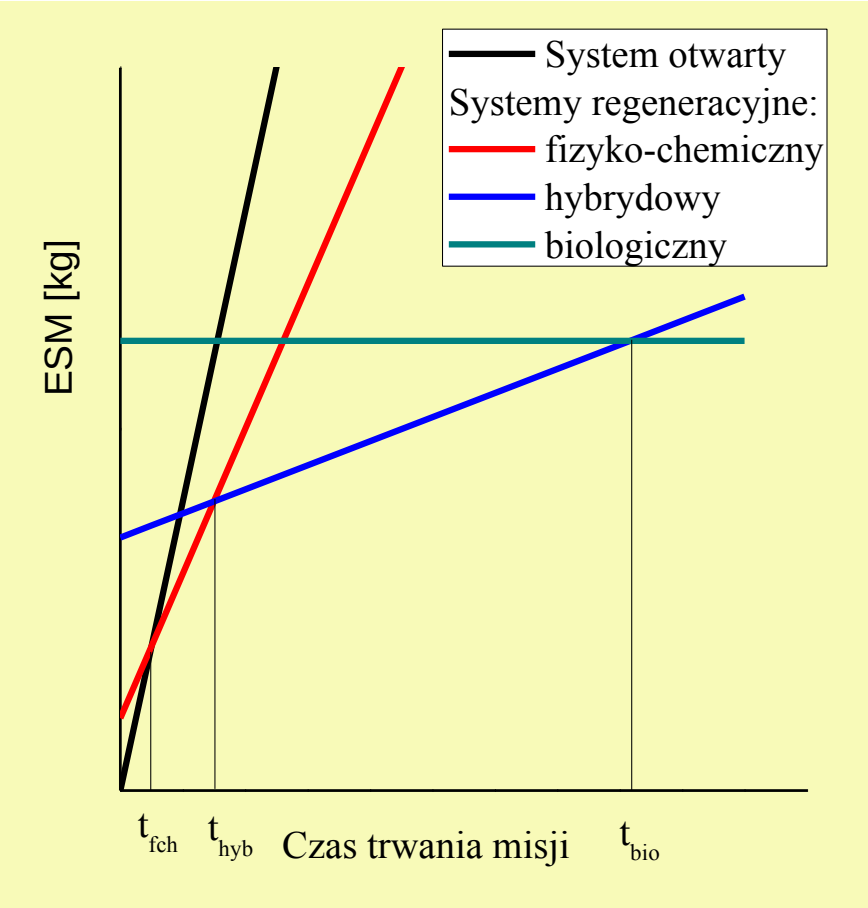
$$ESM = m + V \cdot m_v + P \cdot m_p + C \cdot m_c + \dot{m} \cdot t$$

m – **początkowa masa systemu;**
V – **objętość systemu**
P – **zapotrzebowanie na energie**
C – **wymagania dotyczące chłodzenia systemu;**
m_v, m_p, m_c – **równoważniki masowe**
$\dot{m}$ – **szybkość dostaw potrzebnych substancji z Ziemi**

Na podstawie: Belz S., Ganzer B., Messerschmid E., Friedrich K.A., Schmid-Staiger U., Aerospace Science and Technology, 24, 169-176, 2013

Współczynnik równoważności masy systemu

Equivalent system mass (ESM)



$$t_{1/2} = \frac{m_{sys,1} - m_{sys,2}}{\dot{m}_2 - \dot{m}_1}$$

m_{sys} – *początkowa masa systemu*

$\dot{m}$ – *wymagana szybkość dostarczania potrzebnych substancji*

$$ESM = m + V \cdot m_v + P \cdot m_p + C \cdot m_c + \dot{m} \cdot t$$

	$t_{1/2}$
otwarty → fiz.–chem. (reg.)	50-250 dni
fiz.-chem. (reg.)→ hyb. reg.	1 - 29 lat
hyb. (reg.) → bio. (reg.)	7 - 80 lat

Na podstawie: Belz S., Ganzer B., Messerschmid E., Friedrich K.A., Schmid-Staiger U., Aerospace Science and Technology, 24, 169-176, 2013.

Stan obecny

	Apollo CM/LM	ISS
Cel misji	Księżyc	Orbita okołoziemska
Czas trwania	10 dni	10 lat
Usuwanie CO_2	LiOH	4BMS (sita molekularne)
Redukcja CO_2	Brak	Redukcja CO_2 (Proces Sabatier)
Źródło atmosfery	zbiornik	Redukcja CO_2, elektroliza H_2O
Żródło wody	ogniwa paliwowe, zbiornik (LM)	ogniwa paliwowe, recylkulacja
Ścieki	brak, wyrzucanie	Multifiltracja
Odpady ciekłe metabolizmu	brak, wyrzucanie	VCD
Odpady stałe metabolizmu	gromadzenie w workach	zagęszczanie i gromadzenie w workach

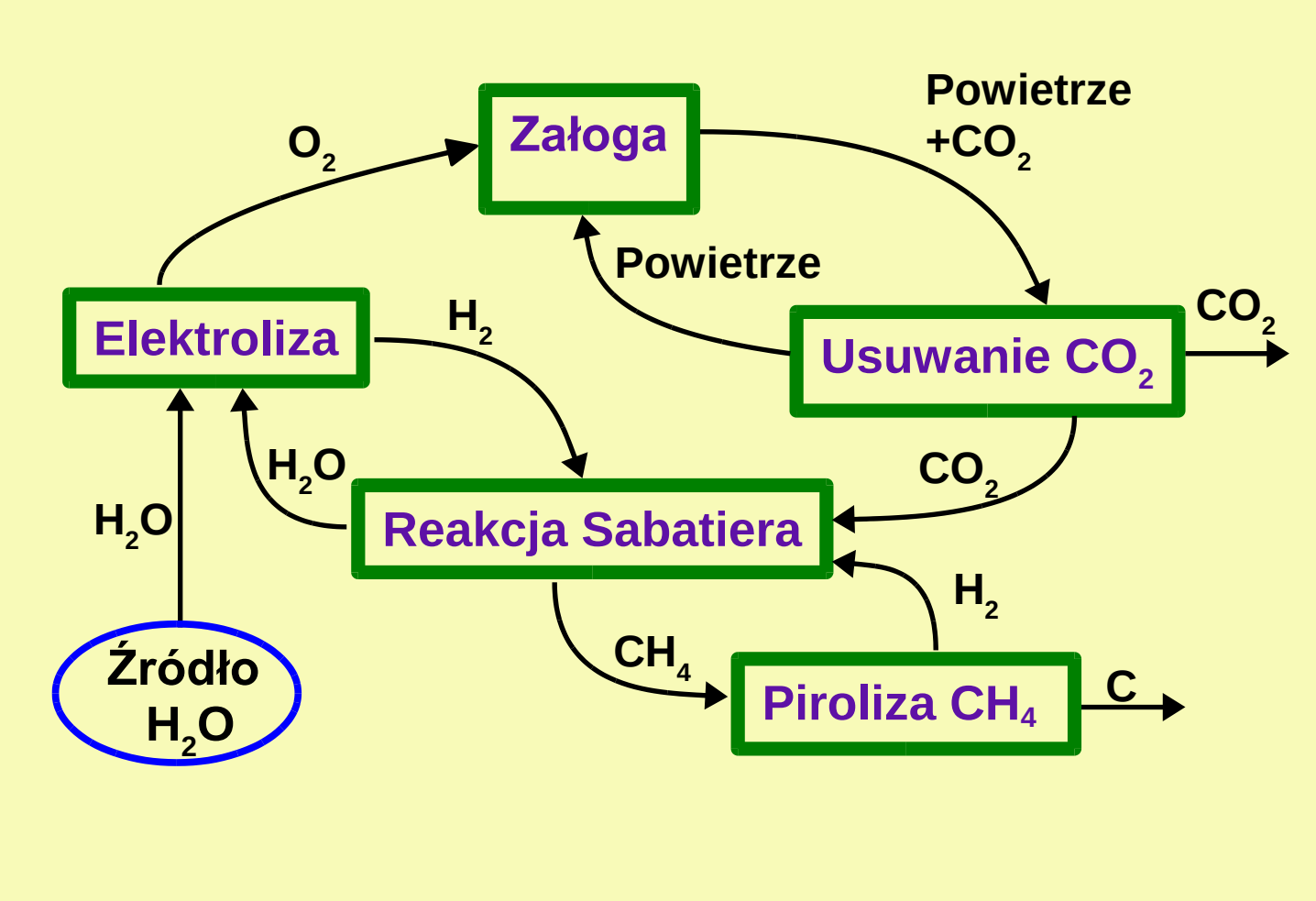
VCD (ang. vapor compression distillation) - rodzaj destylacji

Na podstawie: Jones and Kliss. Advance in Space research 45, 917-928, 2010.

Elementy kontroli atmosfery

- Usuwanie dwutlenku węgla z powietrza
- Dostarczanie tlenu
- Regulacja ciśnienia
- Regulacja wilgoci
- Regulacja temperatury
- Usuwanie śladowych zanieczyszczeń

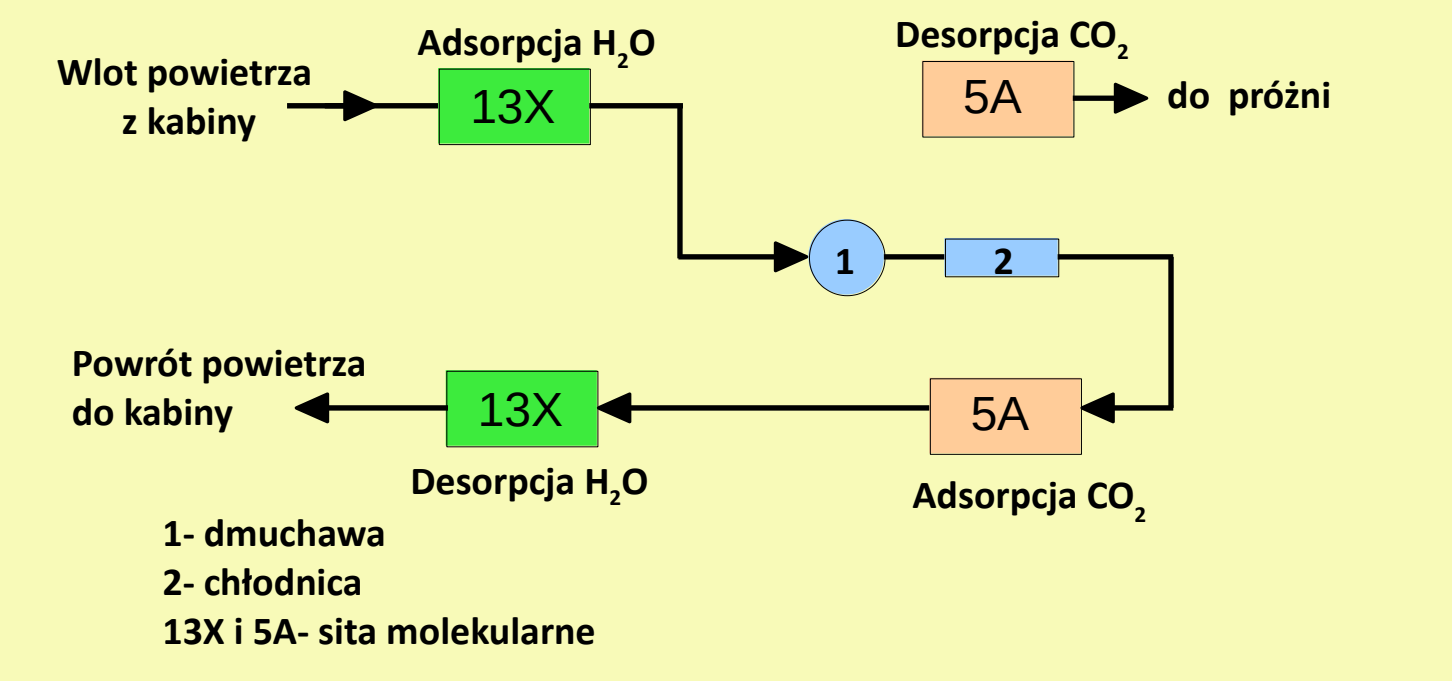
Cykl tlenu



Na podstawie: Ley W., Wittmann K., Hallmann W., Handbook of space technology, Wiley 2009

Usuwanie CO_2 z powietrza

4BMS (ang. four-bed molecular sieve) – 4 sita molekularne



2BMS (ang. two-bed molecular sieve) – 2 sita molekularne

Redukcje masy sytemu można uzyskać stosując specjalnie przygotowane sita węglowe, które nie adsorbują wilgoci z powietrza.

Na podstawie: Eckart P. Spaceflight Life Support and Biospherics, Springer-Science+Business Media 1996

Usuwanie CO_2 z powietrza

SAWD (ang. solid amine water desorption)

Two-bed solid-amine-resin (polystyrene-divinylbenzene copolymer animated with diethylene-triamine)

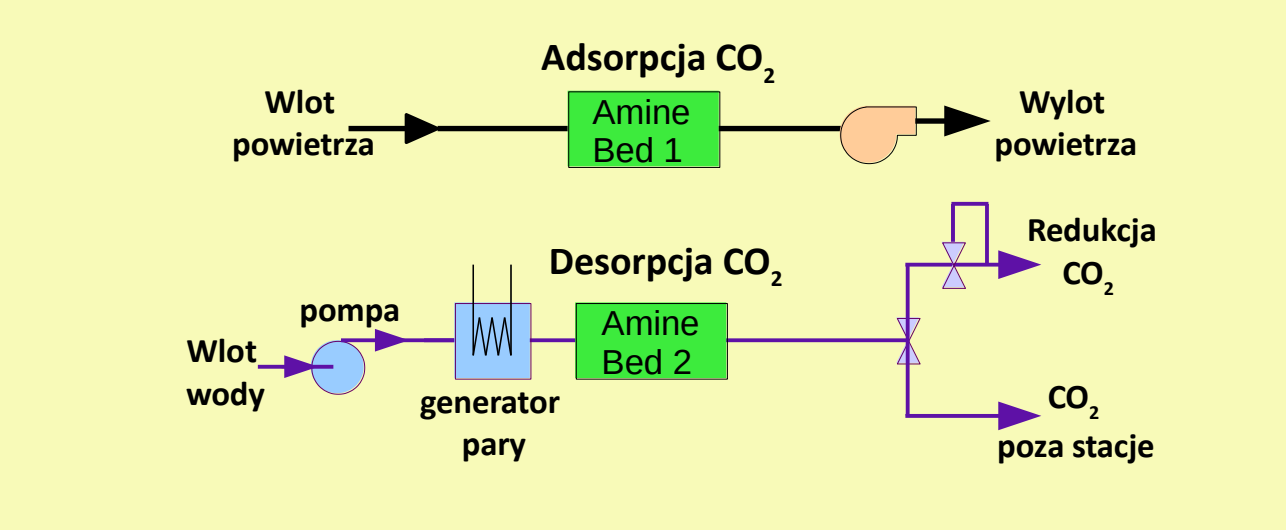
- **Pochłanianie CO_2**

$$Amina + H_2O \rightarrow Amina \cdot H_2O$$

$$Amina \cdot H_2O + CO_2 \rightarrow Amina \cdot H_2CO_3$$

- **Regeneracja**

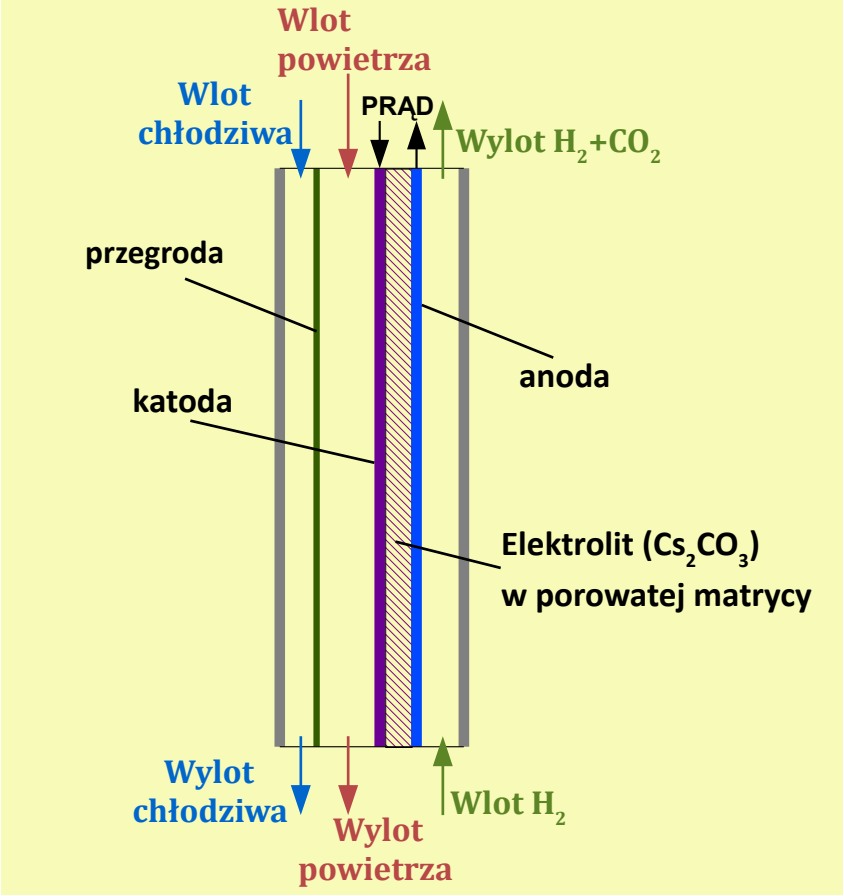
$$Amina \cdot H_2CO_3 + gorąca\ para\ wodna \rightarrow CO_2 + H_2O + Amina$$



Na podstawie: Eckart P. Spaceflight Life Support and Biospherics, Springer-Science+Business Media 1996 i Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988

Usuwanie CO_2 z powietrza

EDC (ang. Electrochemical Depolarization Concentration)



- **Reakcja na katodzie**

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$$

$$CO_2 + 2OH^- \rightarrow H_2O + CO_3^{2-}$$

- **Reakcja na anodzie**

$$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$$

$$H_2O + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + 2OH^-$$

- **Sumaryczna reakcja**

$$CO_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + elektryczna\ energia + ciepło$$

Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988

Regeneracja powietrza

Reakcja Sabatiera

Typowa temperatura procesu: 450-800K Katalizator np.: 20% Ru na Al

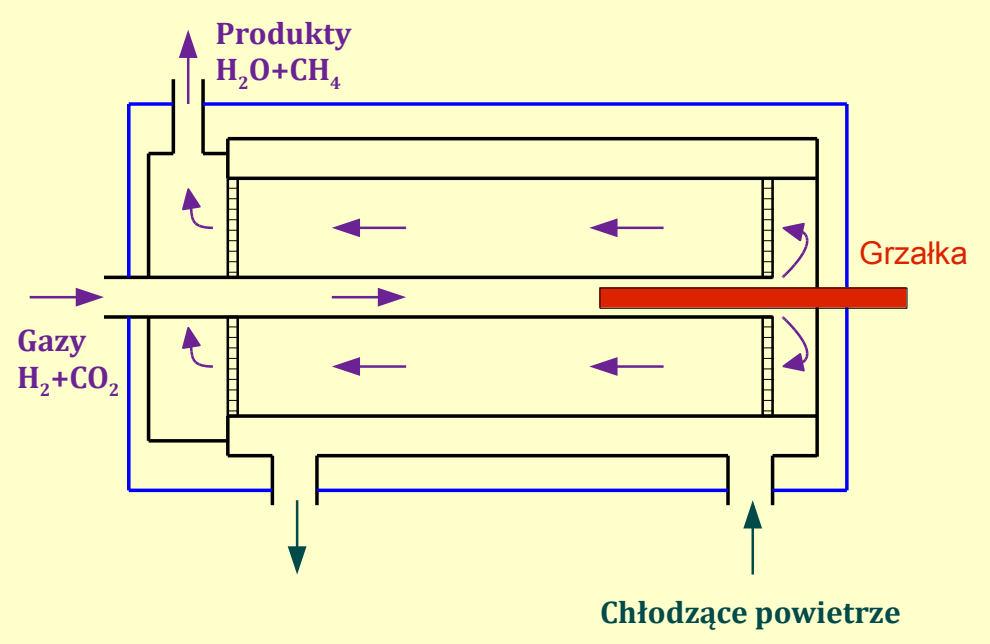
Reakcja dwuetapowa:

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$$

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$$

Sumaryczna reakcja

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + ciepło$$



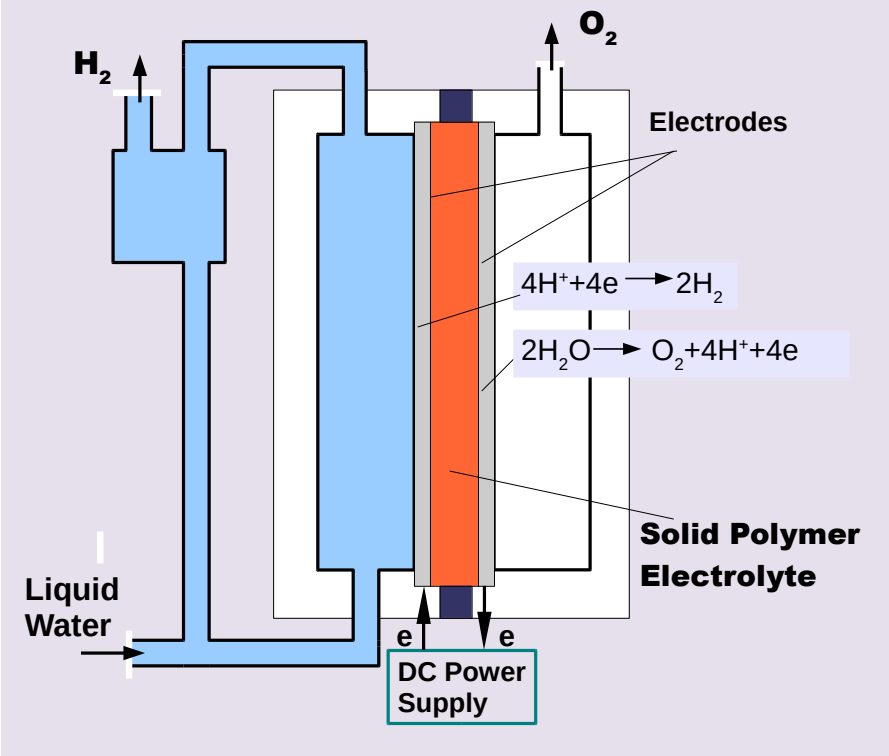
Reakcja Boscha

Typowa temperatura procesu: 700-1000K
Katalizator np.: Ni; Ni/Fe, stopy Ru-Fe

$$CO_2 + H_2 \rightarrow C + 2H_2O + ciepło$$

Na podstawie: Eckart P. Spaceflight Life Support and Biospherics, Springer-Science+Business Media 1996

Elektroliza wody



Reakcja sumaryczna:

$2H_2O + \text{energia} = 2H_2 + O_2 + \text{ciepło}$

Katoda i anoda przedzielone są plastikową membraną, która spełnia rolę elektrolitu: nasycona wodą staje się bardzo dobrym przekaźnikiem jonów miedzy elektrodami

SPWEC
(Solid polymer water electrolysis cell)

Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Elektroliza wody

Reakcja sumaryczna:

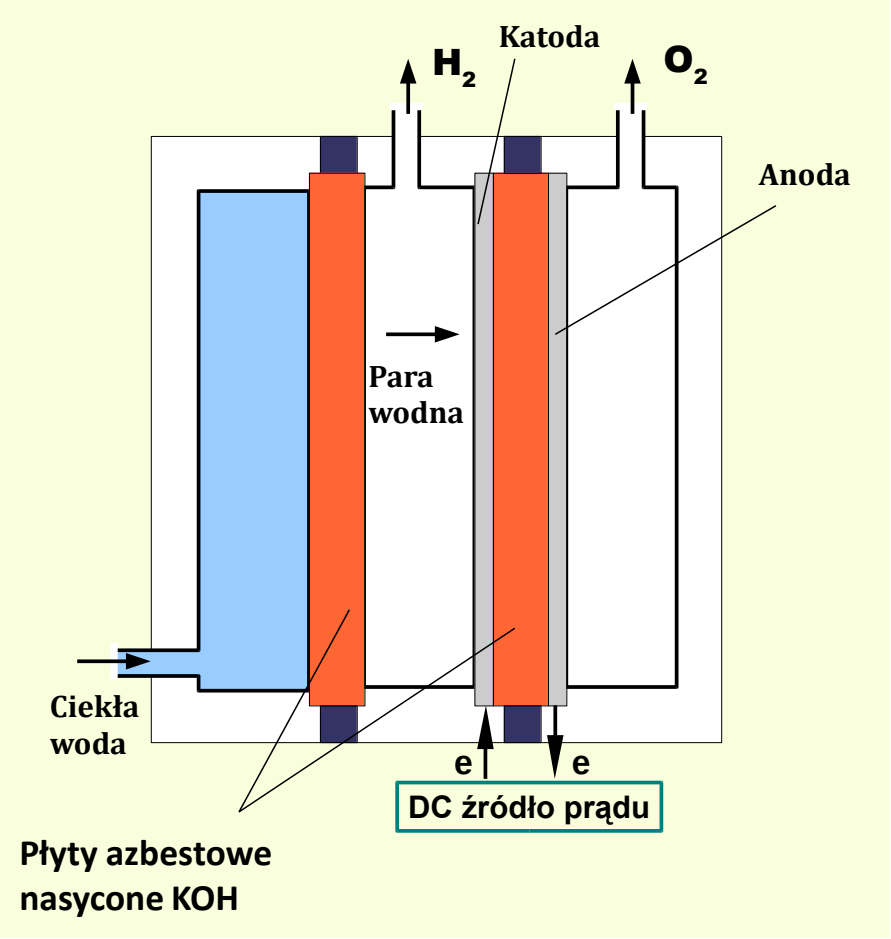
$2H_2O+energia=2H_2+O_2+ciepło$

Reakcja na anodzie:

$4OH^-=O_2+2H_2O+4e^-$

Reakcja na katodzie:

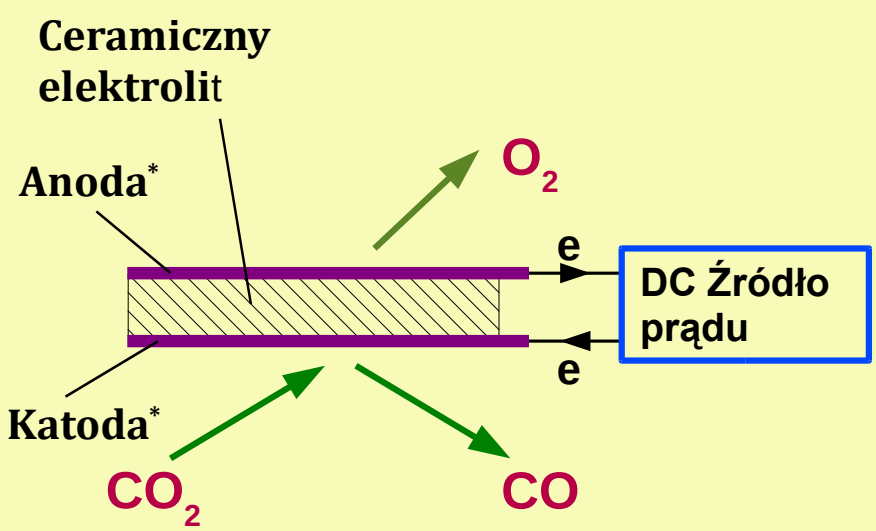
$4H_2O+4e^-=2H_2+4OH^-$



SFWE
(ang. Static feed water electrolysis)

Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988; Sakurai M., Sone Y., Hishida T., Matsushima H., Fukunaka Y. Electrochimica Acta 100, 350-357, 20013

Elektroliza CO_2



* metalowe elektrody przepuszczalne dla gazu

Metoda ta pozwala też na jednoczesną elektrolizę CO_2 i pary wodnej

CO_2 lub mieszanina CO_2 i H_2O są ogrzewane do temperatury 1200K i doprowadzane do katody

- **Reakcja na katodzie**

$$CO_2 + 2e^- \rightarrow CO + O^{2-}$$

- **Reakcja na anodzie**

$$O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$$

Rozdzielenie gazów jest możliwe dzięki temu że tylko jony O^{2-} mogą być transportowane przez ceramiczny elektrolit

CO jest kierowany do innego reaktora gdzie:

$$2CO \rightarrow C + CO_2$$

Na podstawie: Eckart P. Spaceflight Life Support and Biospherics, Springer-Science+Business Media 1996

Regeneracja powietrza

Produkcja tlenu na Marsie

H_2 dostarczany z Ziemi;
CO_2 z atmosfery Marsa

Reakcja Sabatiera

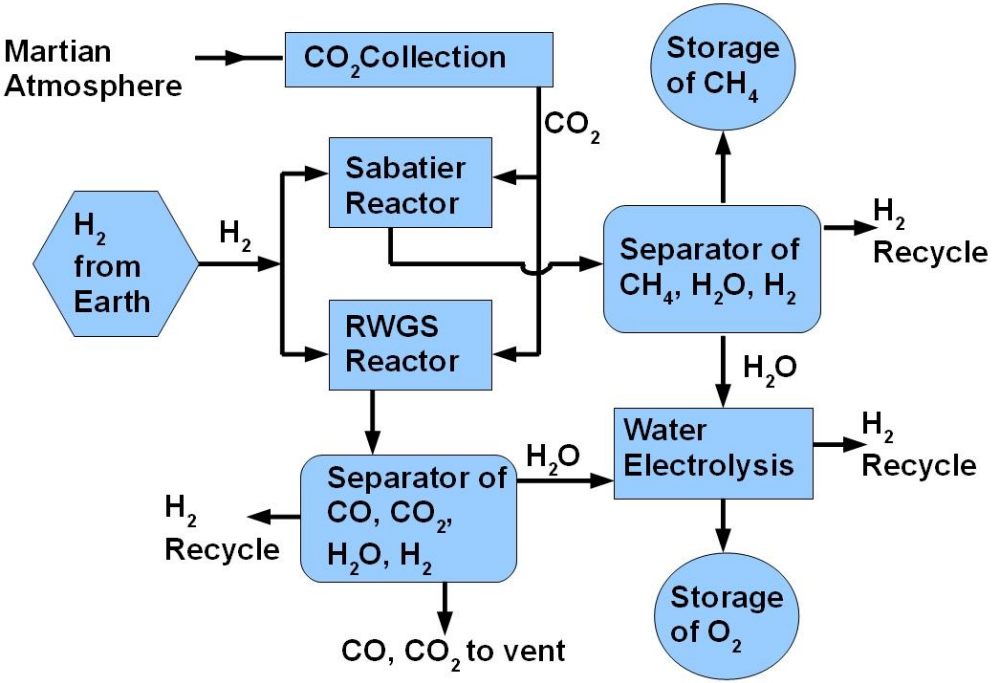
$$CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$$

T<400°C ΔH= -165 kJ/mol

Reakcja RWGS

$$CO_2+2H_2 \rightarrow CO+2H_2O$$

T>650°C ΔH= 35kJ/mol



CH_4 – magazynowany jako paliwo rakiety
H_2O - poddawana elektrolizie – produkty:
H_2 - zawracany do reaktora (np. reakcja Sabatier)
O_2 – do atmosfery lub magazynowany jako utleniacz do paliwa rakiety

Na podstawie: Hu et al. Catalysis 125, 103-110, 2007

Produkcja tlenu na księżycu

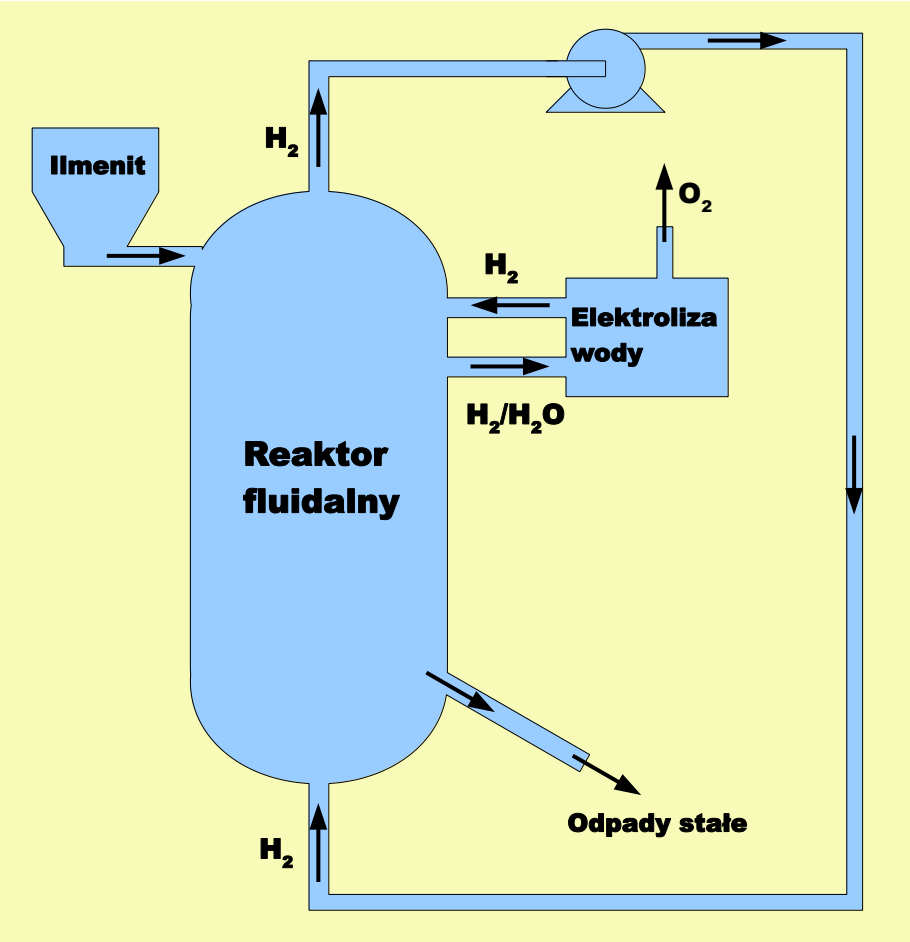
Redukcja ilmenitu

Reaktor fluidalny-
reakcja biegnie w złożu fluidalnym

$$FeTiO_3 + H_2 \rightarrow Fe + TiO_2 + H_2O$$

ΔH= 9.7 kcal/g T=900C

\+ Elektroliza wody



Z jednostki dostarczonego ilmenitu można wyprodukować 10% wagowych tlenu, natomiast pozostałe 90% masy stanowi produkt, który należy usuwać z reaktora

Na podstawie: Microgravity research in support of technologies for the human exploration and development of space and planetary bodies, National Academies Press, 2000

Produkcja tlenu na księżycu

Piroliza tlenków metali zawartych w księżycowym regolicie (zwietrzała skała pokrywająca powieżchnie księżyca)

Ogrzewając regolit księżycowy powoduje się redukcję zawartych w nim tlenków metali, w ten sposób zostaje uwolniony tlen

$$SiO_2(solid) \rightarrow SiO(metalstable\ solid) + 1/2O_2$$

$$FeO(liquid) \longrightarrow FeO(gas)$$

$$FeO(gas) \longrightarrow Fe(gas) + 1/2O_2$$

Na podstawie: Microgravity research in support of technologies for the human exploration and development of space and planetary bodies, National Academies Press, 2000

Odpady ciekłe

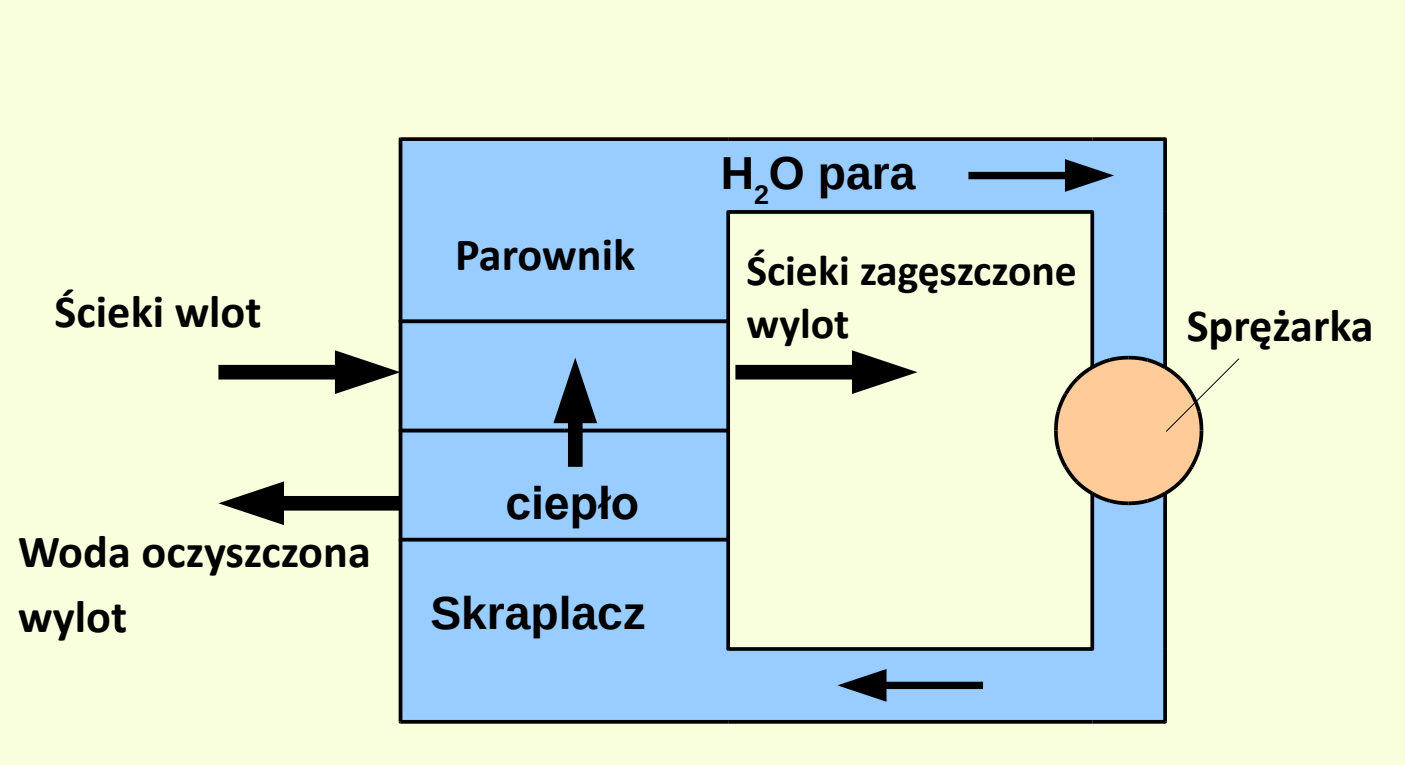
-produkty metabolizmu np. mocz
-woda używana do celów higienicznych
-kondensat z powietrza

Metody postępowania

-Destylacja
-Odwrócona osmoza
-Elektrodializa
-Multifiltracja: mechaniczna filtracja, oczyszczanie w złożu węgla aktywnego, oczyszczanie przy użyciu żywic jonowymiennych

Destylacja VCD (skrót z ang. vapor-compression distillation)

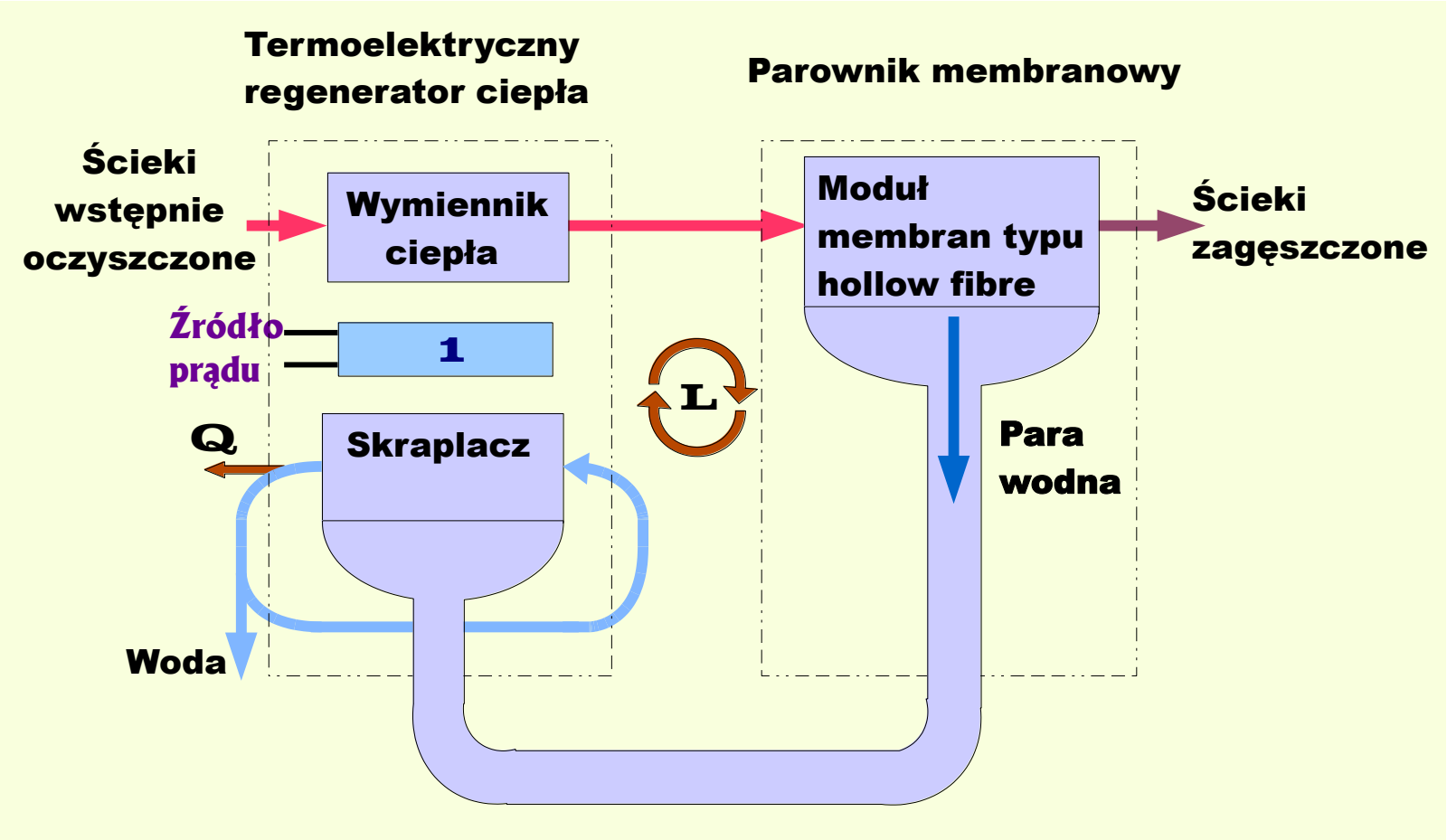
Ścieki zawierające produkty metabolizmu w organizmach ludzi



Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Destylacja TIMES (z ang.:thermoelectric integrated membrane evaporator)

Ścieki zawierające produkty metabolizmu w organizmach ludzi

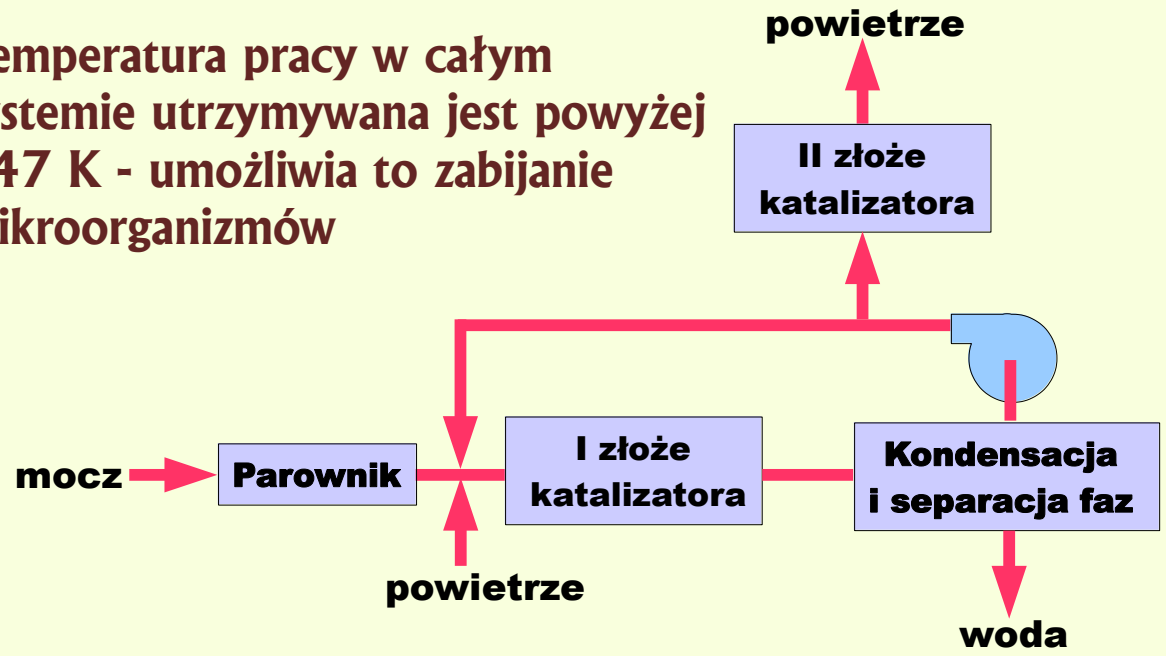


Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Destylacja VAPCAR (z ang.: vapor-phase catalytic ammonia removal)

Ścieki zawierające produkty metabolizmu w organizmach ludzi

Temperatura pracy w całym systemie utrzymywana jest powyżej 347 K - umożliwia to zabijanie mikroorganizmów



- Parownik zawiera plik membran „hollow fibre”
- II złoże katalizatora (0.5% platyny na nośniku z tlenku glinu, 523K)-utlenianie NH_3 do N_2 i N_2O oraz lotne węglowodory do CO_2 i H_2O
- I złoże katalizatora (0.5% rutenu na nośniku z tlenku glinu, 723K)- dekompozycja N_2O do N_2 i O_2

Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Multifiltracja

Ścieki zawierające wodę używaną do celów higienicznych

Proces składa się z trzech etapów:

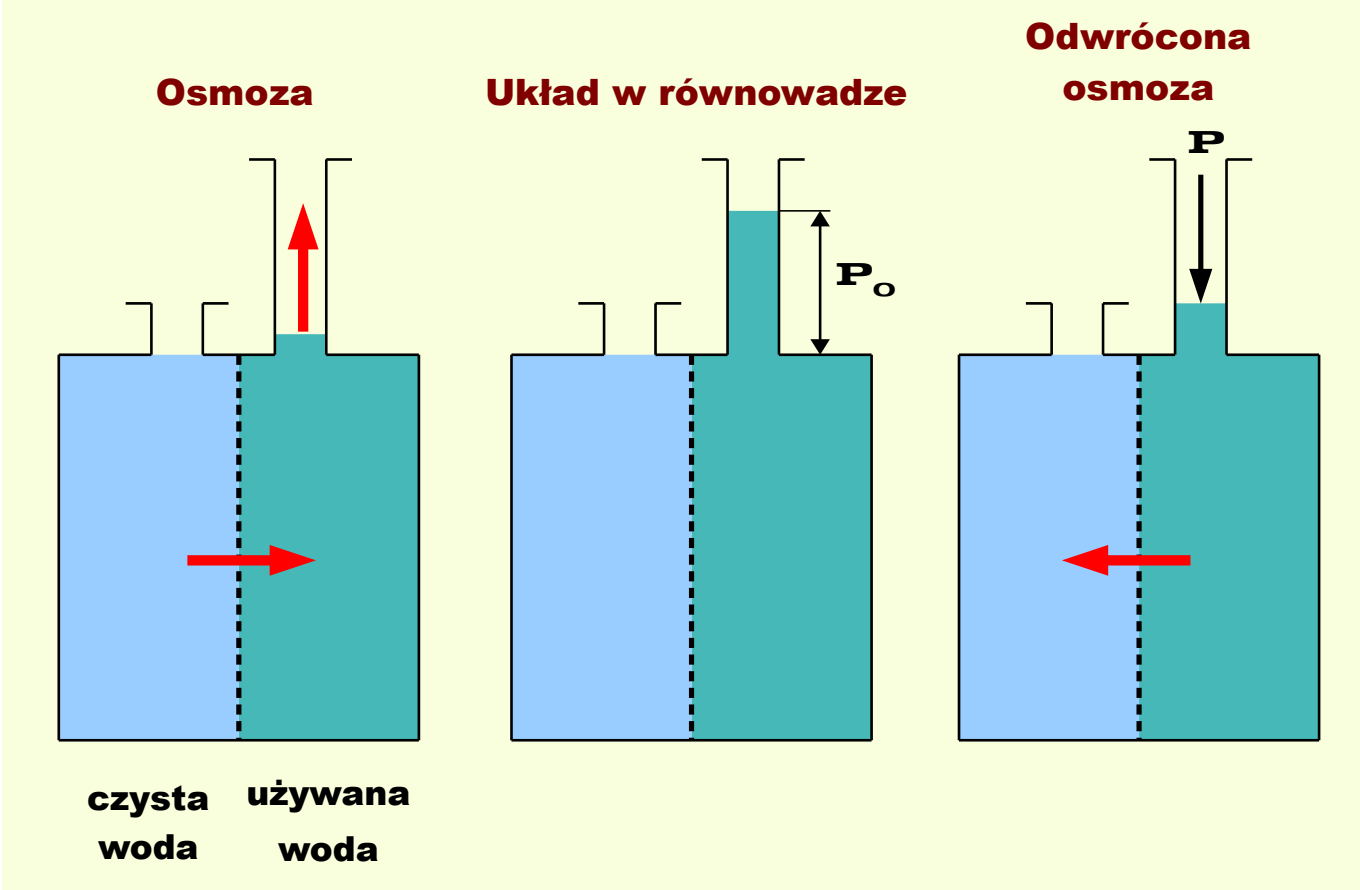
- Mechaniczna filtracja cząstek ciała stałego zawieszonych w zanieczyszczonej wodzie przy pomocy serii filtrów o stopniowo zmniejszających się porach
- Organiczne zanieczyszczenia są usuwane na złożu węgla aktywnego
- Sole nieorganiczne są usuwane na złożu żywicy jonowymiennej

Aby pozbyć się szkodliwych mikroorganizmów cały system jest utrzymywany w temperaturze pasteryzacji (347 K)

Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Osmoza odwrócona

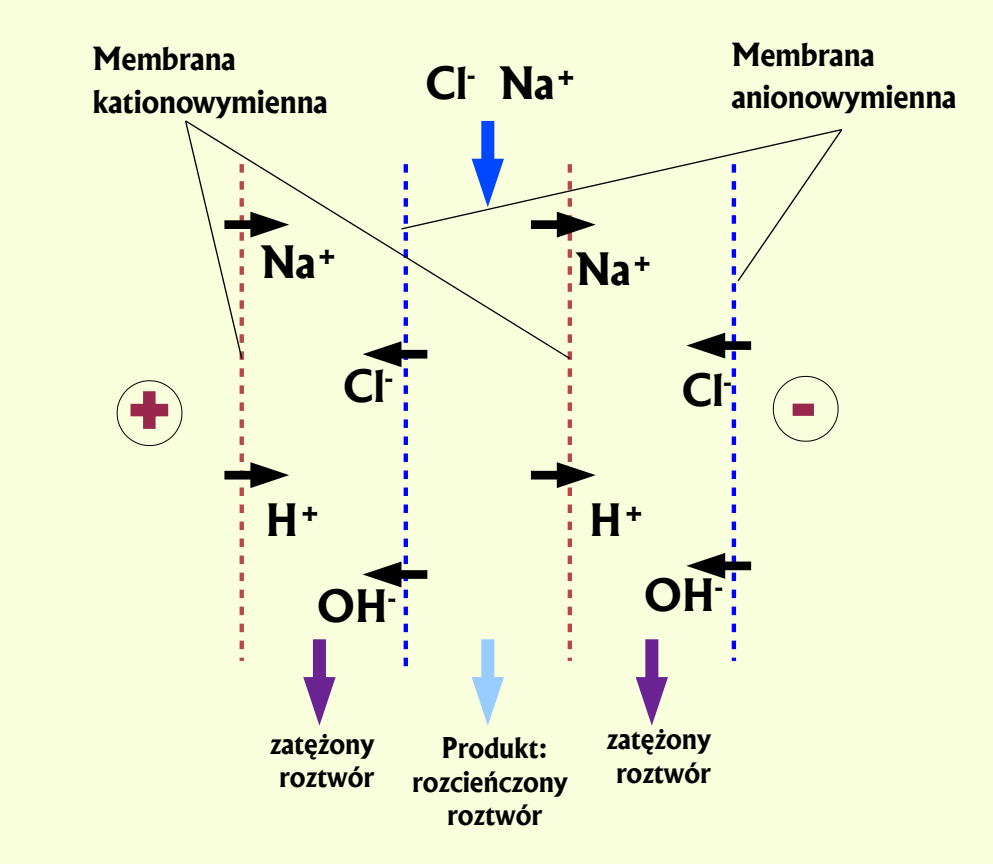
Ścieki zawierające wodę używaną do celów higienicznych



Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Elektrodializa

Ścieki zawierające wodę używaną do celów higienicznych



Na podstawie: Eckart P. Spaceflight Life Support and Biospherics, Springer-Science+Business Media 1996

Odpady stałe

-stałe produkty metabolizmu
-nie jadalne części roślin
-inne odpady stałe np. pojemniki

Metody postępowania

-Spalanie suchych odpadów
-Mokre utlenianie –utlenianie zanieczyszczeń rozpuszczonych lub tworzących zawiesinę w wodzie (wysokie temperatura i ciśnienie)
-Mokre utlenianie gdy woda jest w stanie nadkrytycznym

Spalanie

Odpady stałe

- Spalanie odpadów stałych o małej zawartości wody (stężenie fazy stałej powyżej 50% wagowych) w atmosferze O_2
- Warunki procesu: ciśnienie atmosferyczne i temperatura powyżej 813 K
- Powstałe produkty (woda, nieorganiczne popioły i produkty gazowe głównie CO_2) są sterylne

Problemy

- Niepełne spalanie
- Na ogół wymagane jest wstępnego osuszania odpadów co związane jest z dodatkowym zapotrzebowaniem na energię
- Konieczność uzdatniania powstałej wody

Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Mokre utlenianie

Odpady stałe

- Utlenianie odpadów stałych tworzących zawiesinę wodną w wysokiej temperaturze (473-573K) i ciśnieniu (14 MPa)
- Zawiesina może być nawet bardzo rozcieńczona (5% fazy stałej)
- Do utleniania można używać tlenu lub powietrza
- Proces nie wymaga wtępnego osuszania odpadów

Korzyści:

- Odzysk wody
- Redukcja odpadów stałych do bardzo małej ilości popiołu
- W przypadku stacji kosmicznych, na których rośliny będą hodowane w celu uzyskania żywności, CO_2 i mineralne składniki powstałe w wyniku tego procesu będą mogły być użyte jako składniki odżywcze do hodowli roślin (*Hybrydowy system podtrzymywania życia*)

Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Nadkrytyczne mokre utlenianie

Odpady stałe

Woda w stanie nad krytycznym(powyżej 647 K i $2.21 \cdot 10^7$Pa) jest używana jako medium do utleniania organicznych związków

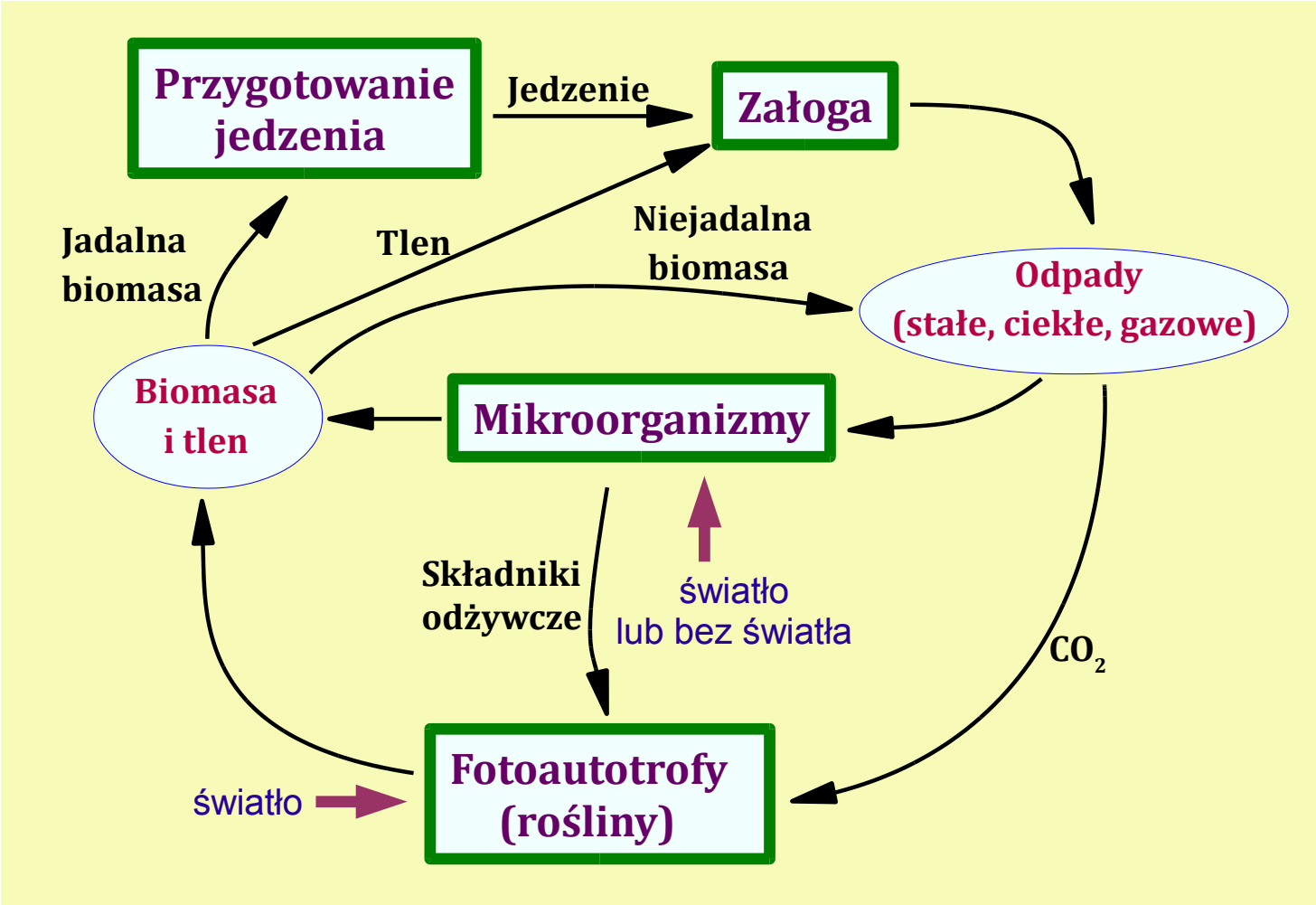
Właściwości wody w stanie nadkrytycznym:

1. Organiczne substancje oraz tlen rozpuszczają się bardzo dobrze w wodzie
2. Sole nie organiczne się w wodzie nie rozpuszczają – co umożliwia ich oddzielenie od fazy wodnej

Proces jest szybki i jednofazowy

Na podstawie: Wydeven T. : A Survey of Some Regenerative Physico-Chemical Life Support Technology, NASA technical Memorandum 101004, 1988;

Produkcja żywności



Na podstawie: Eckart P. Spaceflight Life Support and Biospherics, Springer-Science+Business Media 1996

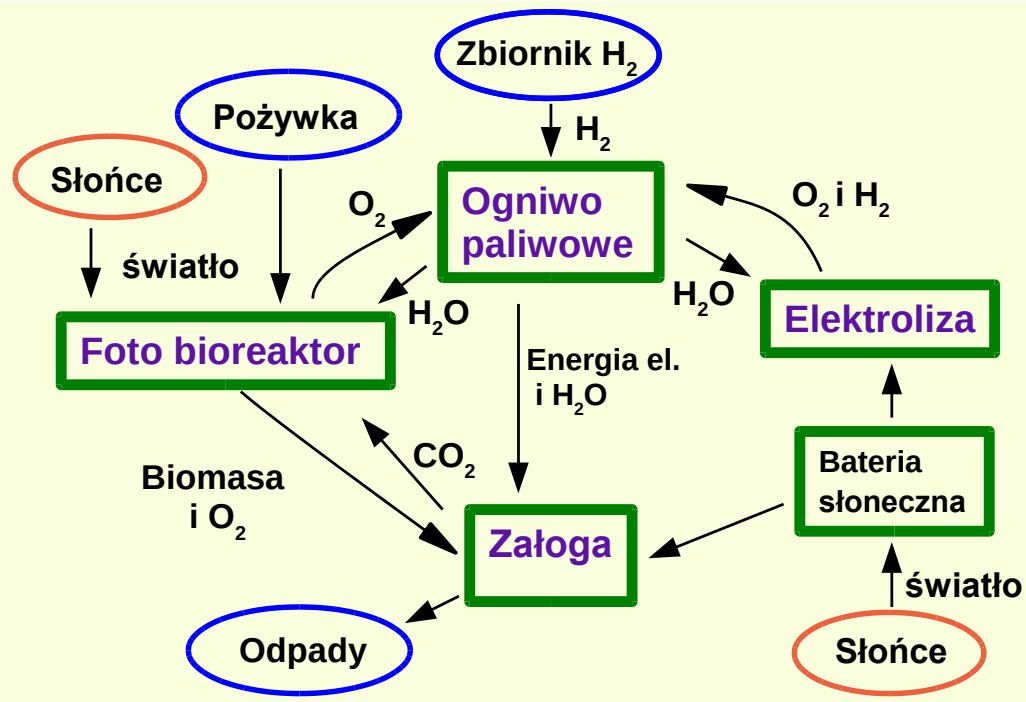
Hybrydowy regeneracyjny system podtrzymywania życia

Propozycja systemu podtrzymywania życia na stacji księżycowej

Składnik sytemu oparty na metodach biologicznych:

foto-bioreaktor do hodowli alg

$$6CO_2 + 12H_2O + E_{h_\upsilon} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O + E_{th}$$



Składnik sytemu oparty na metodach fizyko-chemicznych:

regeneracyjne ogniwa paliwowe (ogniwa paliwowe + elektroliza)

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + E_{el} + E_{th}$$

E_{th} – ciepło
E_{el} – energia elektryczna
E_{hv} – energia słoneczna
$C_6H_{12}O_6$ - biomasa

Na podstawie: Belz S., Ganzer B., Messerschmid E., Friedrich K.A., Schmid-Staiger U., Aerospace Science and Technology, 24, 169-176, 2013

Hodowla roślin wyższych

Na podłożu stały:

•Podłoże naturalne:
-gleba przetransportowana z Ziemi –duży koszt transportu,
-podłoże dostępne na danej planecie – podłoże może zawierać toksyczne substancje np. na podłoże Księżyca zawiera podwyższone zawartości niklu i chromu
•Sztuczna podłoże przygotowane przez człowieka

Uprawa roślin na podłożu stałym jest możliwa gdy istnieje siła grawitacji powodująca ruch wody w takim podłożu
W warunkach mikrograwitacji woda będzie raczej unieruchomiona co będzie miało niekorzystny wpływ na taka uprawę

Na bez podłoża stałego:

Hydroponika

Korzenie roślin są zanurzone w cieczy zawierające rospuszczone substancje odżywcze. Ciecz ta cyrkuluje i jest napowietrzana. Powinna też dostarczać do roślin tlen i wodę.

Aeroponika

Substancje odżywcze są dostarczane do korzeni roślin w postaci rozpylonej mgły

Hodowla zwierząt

-Hodowla zwierząt tradycyjnie spożywanych przez ludzi np. kury, krowy, owce, ryby itp.

- zwierzęta takie jak owce, krowy, czy kury mogą jeść części roślin nie jadane przez ludzi (co jest korzystne), ale potrzebują relatywnie dużych przestrzeni i wytwarzają dużo odpadów oraz intensywny zapach
- hodowla drobiu wydaje się wydaje się łatwiejsza do realizacji w warunkach kosmicznych niż hodowla np. krów
- ryby, których naturalnym środowiskiem jest woda (warunki tego środowiska przypominają nieco stan nieważkości), wydaja się być dobrym wyborem do hodowli na statkach kosmicznych

-Hodowla owadów

Łatwość hodowli, krótki okres wzrostu, nie potrzeba dużej przestrzeni, małe zapotrzebowanie na wodę, brak przykrego zapachu oraz mało odpadów

Przykład: hodowla zmodyfikowanych genetycznie larw jedwabnika przy użyciu części roślin nie jadanych przez ludzi

Na podstawie: Hu et al. Adwance in Space Research 45 (2010) 929-939

Hodowla jadalnej biomasy w bioreaktorach

-Hodowla komórek zwierzęcych w bioreaktorach (np. wołowina)

W bioreaktorze prowadzi się wzrost tkanki zwierzęce, która następnie jest poddawana odkształceniom mechanicznych- w ten sposób można wytworzyć mięso o zadanych właściwości ach odpowiadających określonej części ciała zwierzęcia

-Hodowla mikroorganizmów

-Hodowla alg

Podsumowanie

-Rodzaj sytemu podtrzymywania życia zależy od charakteru misji, oraz jej czasu trwania
-Istotne są takie elementy jak niezawodność sytemu oraz jego masa
-Wykorzystanie dostępnych zasobów (np. na danej planecie) obniża koszty takiego sytemu
-Obecnie większość systemów oparta jest na metodach fizyko chemicznych
-Długo trwałe misje na odległe planety będą wymagać produkcji żywności, a więc wykorzystania metod biologicznych