स्वच्छ ऊर्जा

ए.क्यू.कॉन्ट्रैक्टर

हमारे शहरों में होने वाले वायु प्रदूषण का एक उल्लेखनीय और नज़र आने वाला स्रोत है मोटर गाड़ियों से निकलने वाला धुआँ। इस लेख में परिवहन के एक स्वच्छ-ऊर्जा तरीक़े पर बात की गई है। सौर ऊर्जा का दोहन करके हाइड्रोजन पैदा की जा सकती है और फिर माँग अनुसार उससे बिजली बनाकर विद्युत-वाहन चलाए जा सकते हैं।

सम्भवतः मनुष्यों ने सबसे पहले ऊर्जा का नियंत्रित उपयोग (संयोगवश खोजी गई) आग को जलाए रखना सीखकर किया था। इस आग के लिए ज़रूरी ईंधन शुरू-शुरू में तो जंगल में पड़ी बेजान पत्तियाँ, टहनियाँ और डालियाँ रही होंगी। फिर इसके बाद, आवश्यक औज़ारों की टेक्नोलॉजी उपलब्ध होने पर मनुष्यों ने ईंधन के लिए पेड़ों को काटना शुरू कर दिया होगा। इसके बाद कोयले और पीट (एक क़िस्म का दलदली कोयला) का पता लगने के बाद हमें ऐसे ईंधन उपलब्ध हो गए जिनका ऊर्जा-घनत्व (किसी भी पदार्थ के प्रति इकाई द्रव्यमान में निहित ऊर्जा का परिमाण) कहीं ज़्यादा था और जो असीम मात्रा में मौजूद लगते थे। कोयले के बूते ही 18वीं सदी के यूरोप में औद्योगिक क्रान्ति आई। शुरुआती मोटर-गाड़ियाँ भाप इंजनों से चलतीं थीं जिनमें ईंधन के रूप में कोयले का इस्तेमाल होता था। इसके बाद, आन्तरिक दहन इंजन के आविष्कार के चलते गैसोलिन या पेट्रोल जैसे तरल ईंधन महत्त्वपूर्ण बन गए। तेल के विशाल भण्डारों की खोज ने आधुनिक जीवन के कमोबेश हर पहलू को इतना प्रभावित किया है कि हमें इसका चस्का लग गया है। हमारी ऊर्जा खपत उल्लेखनीय रूप से बढ़ी है। और-तो-और, प्रति व्यक्ति ऊर्जा खपत को 'विकास' का एक मापदण्ड माना जाता है। लेकिन, इस ज़्यादती के कुपरिणामों को हम वायु गुणवत्ता, वैश्विक गर्मी और 'मौसम परिवर्तन' के बतौर भुगत रहे हैं। लिहाज़ा, हमें 'स्वच्छ' ईंधनों की तलाश करनी होगी।

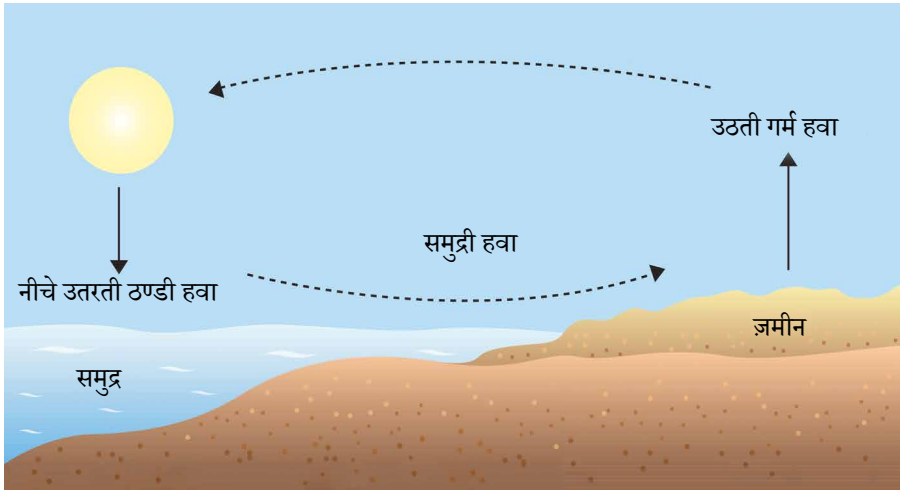
हाइड्रोजन से ऊर्जा

आदर्श रूप से एक ईंधन में दो गुण होने चाहिए – उच्च ऊर्जा घनत्व और स्वच्छ और दक्ष तरीक़े से जलने की क्षमता। वैसे 'आदर्श' ईंधन जैसी कोई चीज़ नहीं हो सकती। हालाँकि कोयला, तेल और गैस जैसे कार्बनमय ईंधन उच्च ऊर्जा-

बॉक्स-1 : जीएचजी और एसपीएम

ग्रीनहाउस गैसों (जीएचजी) से आशय पृथ्वी के वायुमण्डल में मौजूद उन गैसों से है जो उसकी सतह से परावर्तित होने वाली अवरक्त किरणों को सोख लेती हैं और इस तरह उन्हें अन्तरिक्ष में जाने से रोकती हैं। ऊष्मा को क़ैद करने की उनकी क्षमता सतह के व वायुमण्डल के तापमानों में वृद्धि का कारण बनती है। जीएचजी के उदाहरण हैं – जल वाष्प, कार्बन डाईऑक्साइड, नाइट्रस ऑक्साइड और मीथेन।

निलम्बित कण पदार्थ (एसपीएम) वायुमण्डल में निलम्बित द्रव और ठोस पदार्थों का एक अघुलनशील मिश्रण होते हैं। धूल, राख, परागकणों और धुएँ से बने एसपीएम वायु प्रदूषण के लिए सबसे ज़्यादा ज़िम्मेदार होते हैं।



चित्र-1 : सूरज द्वारा ज़मीन और समुद्र की असमान तपाई के चलते स्थानीय हवाएँ बहती हैं।
Credits: Adapted from an image by Crystal Wicker on Weather Wiz Kids. URL: http://www.weatherwizkids.com/weather-wind.htm.

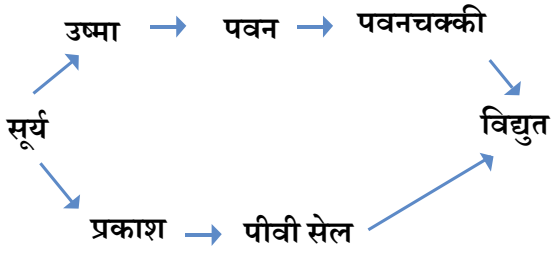
घनत्व वाले ईंधन होते हैं; 'स्वच्छ' ईंधन ग्रीनहाउस गैसें (जीएचजी), निलम्बितकण पदार्थ (एसपीएम) या सल्फ़र व नाइट्रोजन के ऑक्साइड्स पैदा नहीं करते (**बॉक्स-1**)। आज हमारे द्वारा तलाशे जा रहे अनेक विकल्पों में हाइड्रोजन एक सम्भावनापूर्ण स्वच्छ ईंधन नज़र आता है। इसका ऊर्जा घनत्व काफ़ी अधिक है – तेल की तुलना में, प्रति इकाई भार, कोई तीन गुना। इसके अलावा, हवा में जलने पर यह पानी उत्पन्न करती है, न कि जीएचजी या एसपीएम। ऊर्जा के स्रोत के बतौर, हाइड्रोजन के इस्तेमाल का प्रस्ताव सबसे पहले जेबीएस हाल्डेन ने 1923 में रखा था। फिर 1970 में, जॉन बोक्रिस ने 'हाइड्रोजन अर्थव्यवस्था' शब्द का इस्तेमाल किया जो कार्बनमय ईंधनों के बूते नहीं, बल्कि हाइड्रोजन के बल पर ऊर्जित होगी। इसके लिए, एक ईंधन के बतौर हाइड्रोजन के उत्पादन, भण्डारण और इस्तेमाल हेतु नई प्रौद्योगिकियों की ज़रूरत होगी। बदक़िस्मती से, प्रकृति में आणविक हाइड्रोजन स्वतंत्र रूप से उपलब्ध नहीं होती। पानी के विद्युत अपघटन द्वारा इसका उत्पादन तो किया जा सकता है, लेकिन इससे बिजली कैसे प्राप्त की जाए कि पर्यावरण को कोई नुक़सान न पहुँचे?

जैसा कि ज़्यादातर मामलों में होता आया है, यहाँ भी क़ुदरत का ही इशारा हमें मिला — पृथ्वी पर मौजूद तमाम जीवन के लिए ज़रूरी ऊर्जा अन्ततः सूरज से ही मिलती है। सो, या तो फ़ोटोवोल्टेइक सेलों की मदद से सीधे-सीधे सूरज से ऊर्जा का दोहन किया जा सकता है या फिर सूरज की गर्मी के चलते असमान ढंग से तपती धरती की सतह के नतीजतन पैदा हुई पवनशक्ति से परोक्ष ढंग से यह ऊर्जा पाई जा सकती है (**चित्र-1**)।

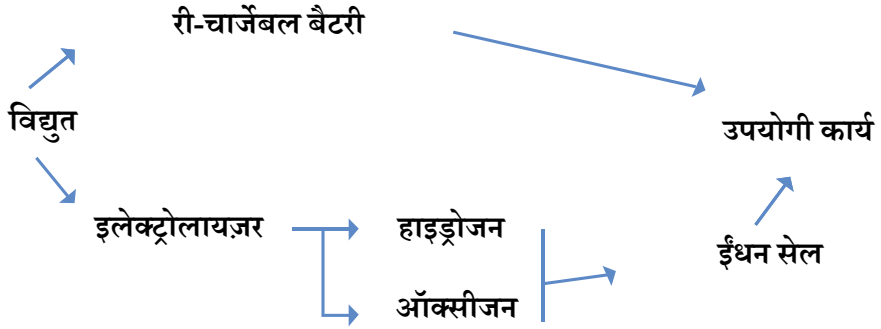
इन दोनों तरीक़ों से प्राप्त ऊर्जा से बिजली बनाई जा सकती है (**चित्र-2**)। सौर ऊर्जा को भण्डारित करने की ज़रूरत पड़ सकती है ताकि उसका उपयोग रात में या कम धूप वाले दिनों में किया जा सके।

हाइड्रोजन के रूप में रासायनिक भण्डारण इसका एक सबसे टिकाऊ तरीक़ा है। एक और विकल्प है फ़ोटोवोल्टेइक सेलों से प्राप्त विद्युत ऊर्जा की मदद से मोटर-गाड़ियों में प्रयुक्त होने वाली लेड-ऍसिड बैटरियों को या फिर पोर्टेबल उपकरणों (मोबाइल फ़ोन, लैपटॉप आदि) के लिथियम सेलों को चार्ज करना।

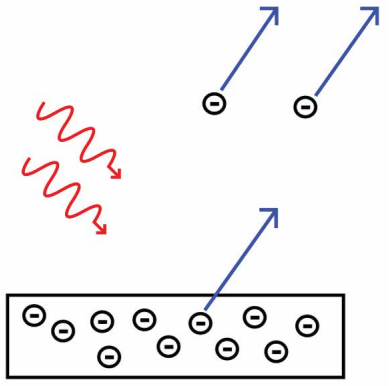
बिजली को री-चार्जेबल बैटरियों में संग्रहित किया जा सकता है या इससे पानी का विद्युत-अपघटन करके हाइड्रोजन व ऑक्सीजन बनाई जा सकती है (**चित्र-3**)। दहन-इंजन में हाइड्रोजन जलाना तो ख़ैर बहुत ख़तरनाक होगा, लेकिन ज़रूरत पड़ने पर किसी 'ईंधन सेल' में हाइड्रोजन का 'दहन' कर ऊर्जा प्राप्त की जा सकती है।



चित्र-2 : विद्युत उत्पादन के लिए सौर ऊर्जा का उपयोग करना।
Credits: A. Q. Contractor. License: CC-BY.



चित्र-3 : हाइड्रोजन के उत्पादन के लिए विद्युत का उपयोग।
Credits: A. Q. Contractor. License: CC-BY.



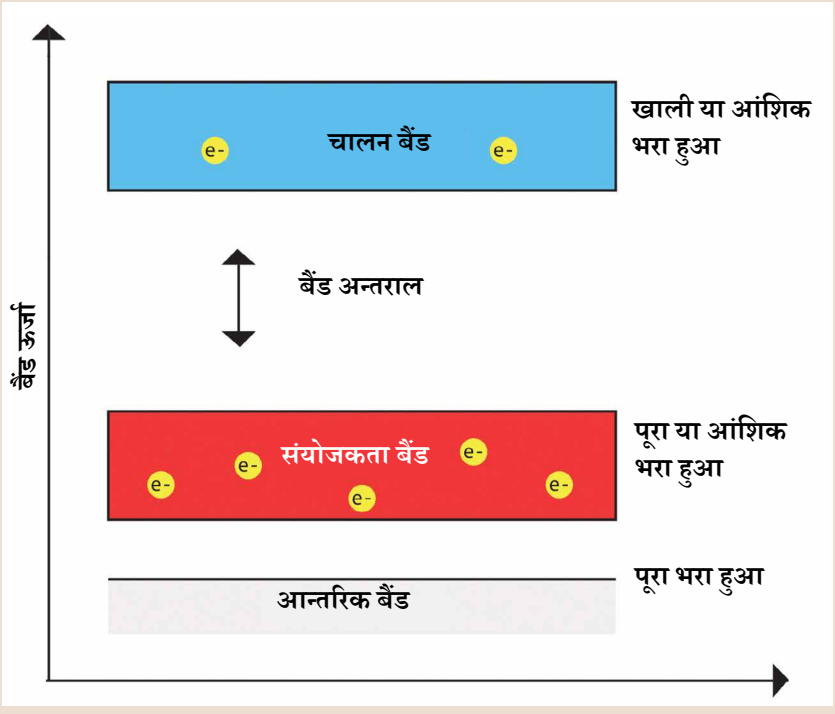
चित्र-4: प्रकाश-विद्युत प्रभाव।
Credits: Wolfmankurd, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.svg. License: CC-BY-SA.

फ़ोटोवोल्टेइक सेल (बैटरियाँ)

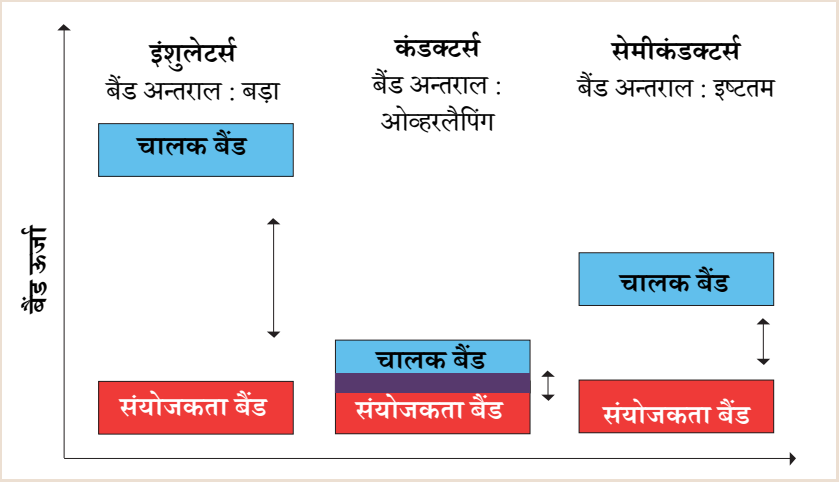
ये बैटरियाँ ऐसे उपकरण होते हैं जिनमें प्रकाश-विद्युत प्रभाव से सूर्य प्रकाश (~फ़ोटो) को विद्युत ऊर्जा (~वोल्टेइक) में बदला जाता है (**चित्र-4**)। इस परिघटना में, कुछ ख़ास प्रकार के पदार्थों पर जब विद्युत-चुम्बकीय विकिरण (दृश्य प्रकाश, पराबैंगनी, अवरक्त किरणें आदि) डाला जाता है तो वे आवेश-वाहक (इलेक्ट्रॉन या आयन) छोड़ते हैं। इन मुक्त आवेशित कणों को क़ैद करके बिजली पैदा की जा सकती है। चूँकि सिलिकॉन में फ़ोटॉनों को अवशोषित करने के हिसाब से लगभग इष्टतम

बॉक्स-2 : बैंड-अन्तराल और प्रकाश-विद्युत प्रभाव

कोई पदार्थ प्रकाश-विद्युत प्रभाव तभी दिखाता है जब उत्तेजित इलेक्ट्रॉनों को उसके संयोजकता बैंड (कम ऊर्जा वाला इलेक्ट्रॉन कक्षक) व चालन बैंड (उच्चतर ऊर्जा का इलेक्ट्रॉन कक्षक) के ऊर्जा अन्तराल को पार करने के लिए आवश्यक ऊर्जा एक फ़ोटॉन की ऊर्जा के बराबर हो जाए (**चित्र-5**)। चालन बैंड में जितने ज़्यादा इलेक्ट्रॉन होंगे पदार्थ की विद्युत चालकता उतनी ही ज़्यादा होगी। बिजली के कुचालकों का बैंड-अन्तराल काफ़ी ज़्यादा होता है, जबकि सुचालकों के स्वतंत्र इलेक्ट्रॉन इतनी अधिक बेतरतीबी से भटकते रहते हैं कि विद्युत धारा नहीं बना पाते हैं। लिहाज़ा, मध्यवर्ती बैंड अन्तराल वाले सेमीकंडक्टरों में ही आवेश-वाहकों को सबसे ज़्यादा प्रभावी ढंग से उत्तेजित किया जा सकता है (**चित्र-6**)।

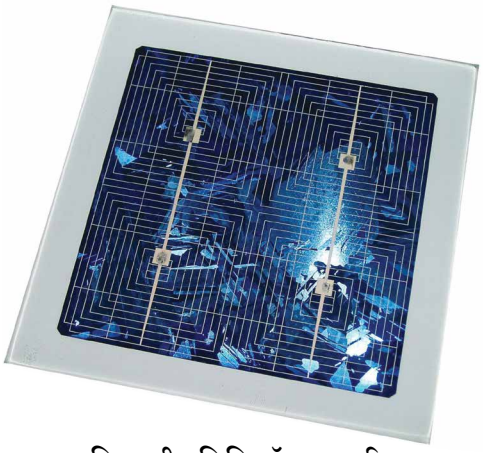


चित्र-5 : संयोजकता और चालन बैंड्स में ऊर्जा-अन्तराल।
Credits: Adapted from an image on Physics and Radio Electronics. URL: http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor/hole.html.



चित्र-6 : सेमीकंडक्टर में ऊर्जा का अन्तराल उसे पीवी सेल में सबसे प्रभावी पदार्थ बनाता है।

Credits: Adapted from an image by Pieter Kuiper, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Isolator-metal.svg.

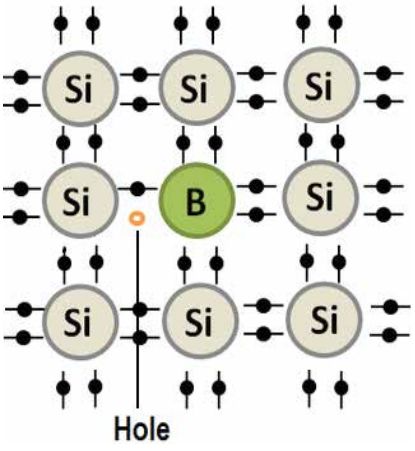


चित्र-7 : बहुक्रिस्टलीय सिलिकॉन-आधारित सोलर सेल।

Credits: Nosferatu it (modified by Rogilbert) Wikimedia Commons. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/File:4inch_poly_solar_cell.jpg. License: CC-BY-SA.

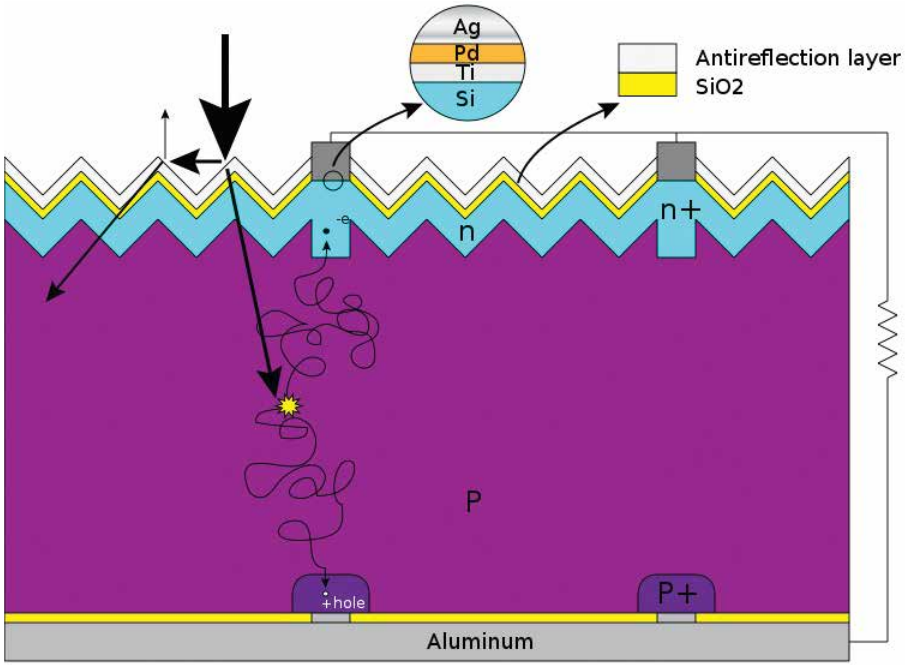
बैंड-गैप होता है (**बॉक्स-2**), व्यावसायिक रूप से उपलब्ध लगभग सारी फ़ोटोवोल्टेइक (पीवी) बैटरियाँ क्रिस्टलीय सिलिकॉन आधारित होती हैं। सिलिकॉन आधारित पीवी सेल (Si-PV **चित्र-7**) में सिलिकॉन परमाणु एक फ़ोटॉन अवशोषित कर एक इलेक्ट्रॉन छोड़ते हैं। इसके बाद, यह इलेक्ट्रॉन सतह की ओर गति करता है और उसे चाँदी के सम्पर्क बिन्दु के द्वारा संचारित किया जाता है और वह अपने पीछे धनावेशित इलेक्ट्रॉन रिक्ति छोड़ जाता है (**चित्र-8**)। यह इलेक्ट्रॉन रिक्ति एल्यूमिनियम सम्पर्क बिन्दु की ओर जाती है। नतीजतन ऍल्यूमिनियम से चाँदी की ओर एक विद्युत धारा बहने लगती है (**चित्र-9**)। अब चूँकि एक सिलिकॉन पीवी बैटरी 1 वोल्ट से कम का विद्युत विभव उत्पन्न करती है, इसलिए ऐसे बहुत सारे सेल एक-दूसरे के साथ मॉड्यूलर शैली में जोड़ दिए जाते हैं ताकि ज़्यादा वोल्टेज पैदा हो।

सोलर फ़ोटोवोल्टेइक सेल अब एक आम नज़ारा हो गए हैं, ख़ासकर सड़क किनारे की



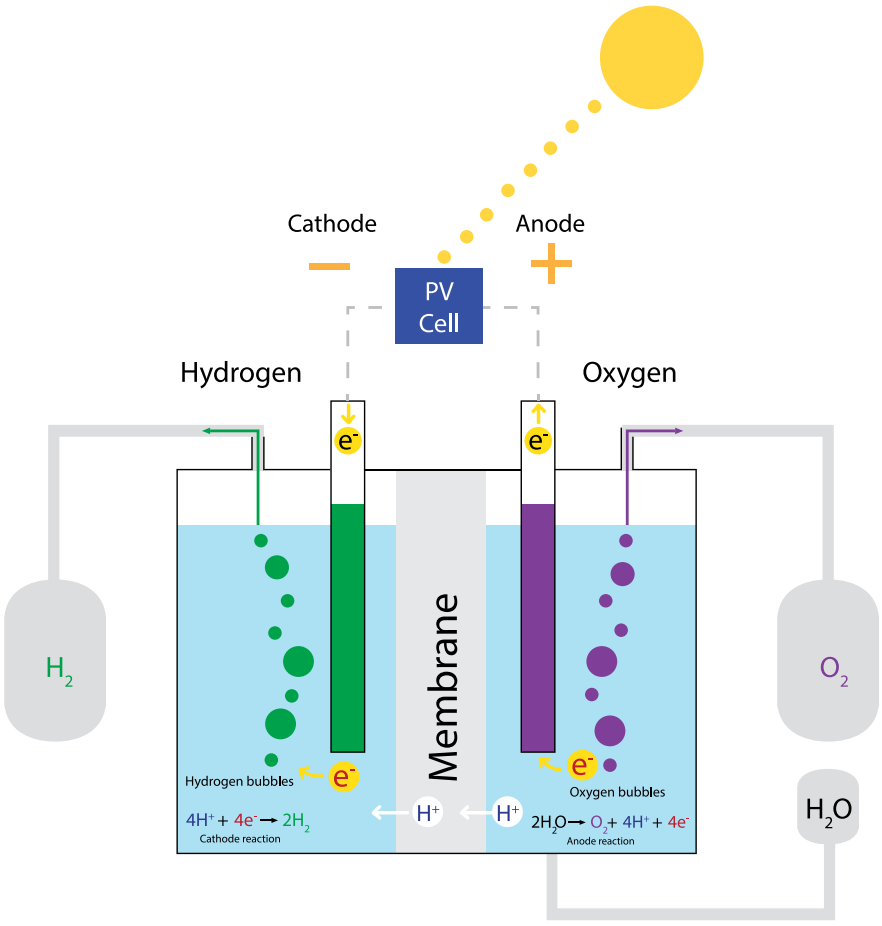
चित्र-8 : सिलिकॉन क्रिस्टल की एक जालक (लैटिस) से एक इलेक्ट्रॉन निकल जाने से उसमें एक छेद बन जाता है।

Credits: J.M.K.C. Donev et al. (2018). Energy Education - Electron hole [adapted from HyperPhysics, (August 20, 2015): P and N-Type Semiconductors (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/dope.html)]. URL: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Electron_hole. [Accessed: August 28, 2018] License: CC-BY-SA.



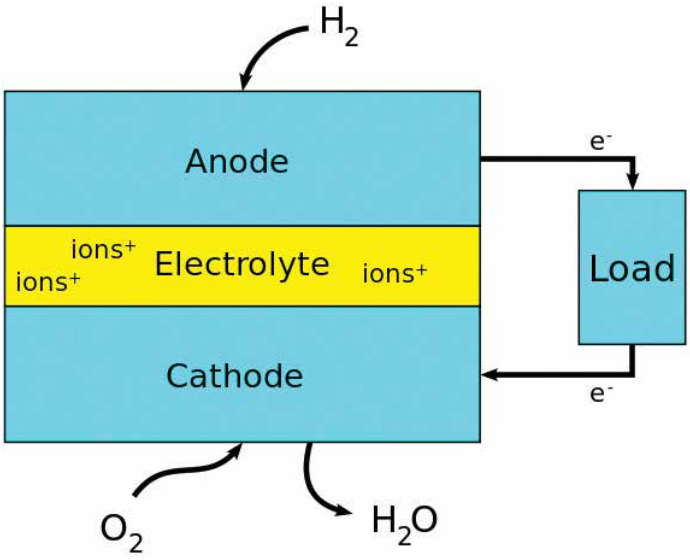
चित्र-9 : एक सिलिकॉन पीवी सेल की एक अनुप्रस्थ काट।

Credits: Cyferz, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17902127. License: CC-BY.



चित्र-10 : पीवी मॉड्यूल द्वारा उत्पन्न डी.सी. धारा पर काम करने वाले एक विशिष्ट जल इलेक्ट्रोलाइजर का योजना आरेख।

Credits: Adapted from images by The Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, The U.S Department of Energy (URL: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis) and DavidIfritz, Wikimedia Commons (URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26251918).



चित्र-11 : एक ईंधन-सेल के घटक।

Credits: Paulsmith99, Wikimedia Commons. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Fuel_Cell_Block_Diagram.svg. License: CC-BY.

रोशनी में। पॉवर ग्रिड से नहीं जुड़े दूर-दराज़ के क्षेत्रों में रोशनी के लिए सिलिकॉन पीवी सेल तेज़ी से एक लोकप्रिय विकल्प बन रहे हैं।

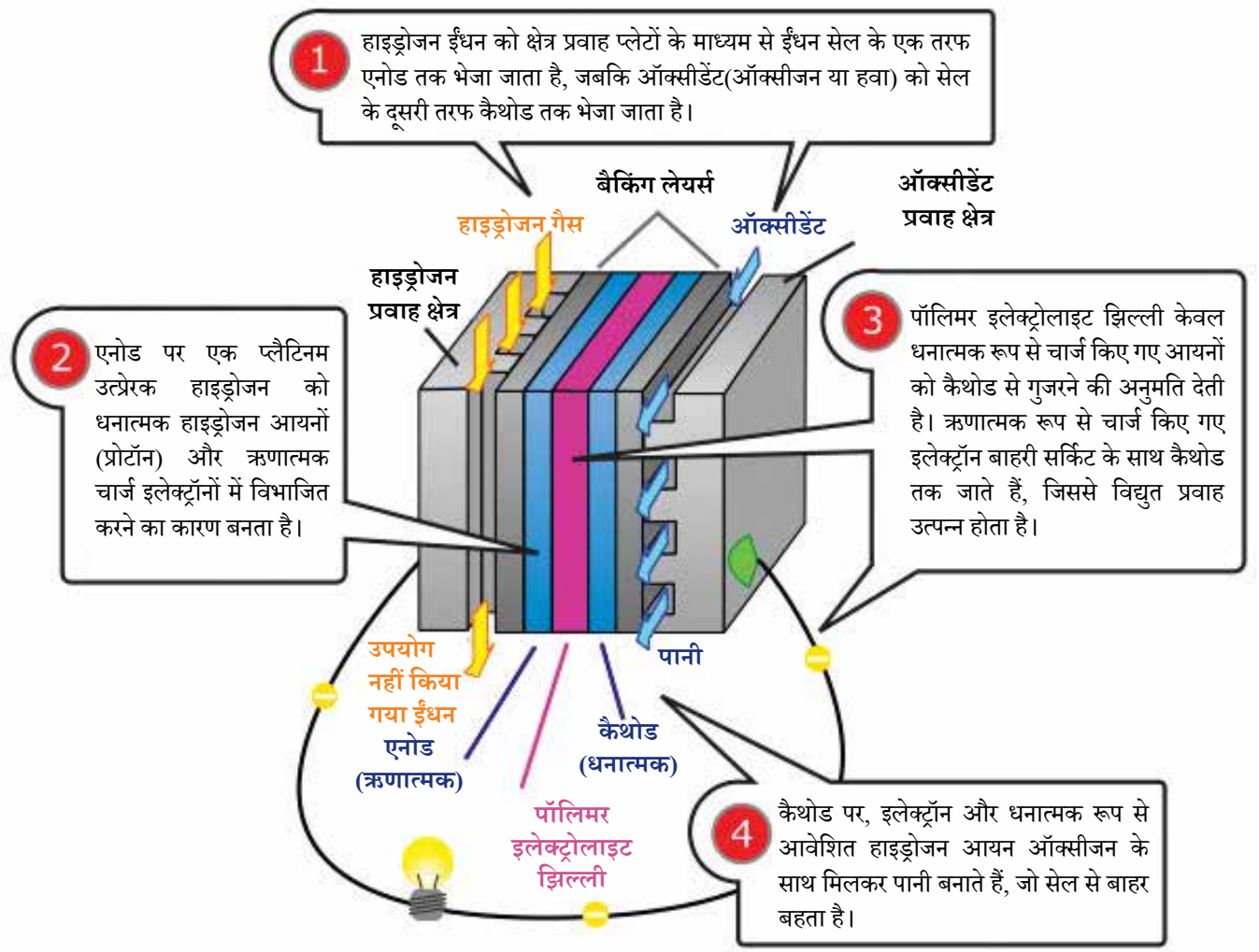
इलेक्ट्रोलाइज़र

18वीं सदी के उत्तरार्ध में दर्शाया गया कि पानी के अपघटन के द्वारा उसे 2:1 के अनुपात में गैसीय हाइड्रोजन और ऑक्सीजन में विघटित किया जा सकता है। आधुनिक इलेक्ट्रोलाइज़र्स का आधार यही अभिक्रिया है।

एक सामान्य वॉटर इलेक्ट्रोलाइज़र (**चित्र-10**) में एक प्रोटॉन-संचारी झिल्ली, कैथोड और ऍनोड हिस्सों को एक-दूसरे से अलग रखती है। ऍनोड पर इलेक्ट्रॉन रिक्तियाँ पानी को प्रोटॉन्स और ऑक्सीजन गैस में ऑक्सीकृत करती हैं, जबकि उनके इलेक्ट्रॉन अम्लीकृत पानी के प्रोटॉनों के द्वारा ग्रहण कर लिए जाते हैं और कैथोड वाले हिस्से में हाइड्रोजन बनाते हैं। ख़र्च हुए आयतन का सन्तुलन बनाए रखने के लिए इलेक्ट्रोलाइज़र में लगातार पानी डाला जाता है। इन दोनों गैसों को उच्च दाब पर सिलेंडरों में या भण्डारण के लिए उपयुक्त पदार्थ के जालक (लैटिस) में संग्रहित किया जा सकता है।

ईंधन सेल

ये उपकरण रासायनिक अभिक्रियाओं से मुक्त ऊर्जा से विद्युत और ऊष्मा पैदा करते हैं। किसी भी ईंधन सेल में तीन सटे हुए हिस्से होते हैं – ऍनोड, इलेक्ट्रोलाइट और कैथोड (**चित्र-11**)। इस असेंबली की दोनों सम्पर्क सतहों पर रासायनिक अभिक्रियाएँ होती हैं। इलेक्ट्रोलाइट की प्रकृति के अनुसार ईंधन सेल अलग-अलग हो सकते हैं। उदाहरण के लिए, प्रोटॉन एक्सचेंज मेंब्रेन (पीईएम) ईंधन सेल में प्रयुक्त इलेक्ट्रोलाइट एक अम्लीय, पानी-आधारित बहुलक झिल्ली (**चित्र-12**) के रूप में होता है। हवा की ऑक्सीजन और एक सिलेंडर या टैंक में भण्डारित सम्पीड़ित आणविक हाइड्रोजन के संयोजन से मुक्त ऊर्जा से बिजली बनती



चित्र-12 : एक प्रोटॉन एक्सचेंज मेंब्रेन (पीईएम) ईंधन-सेल।
Credits: Jafet, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3APEM_fuelcell.svg. License: Public Domain.

चित्र-13 : ईंधन-सेल से चलने वाली एक बस।
Credits: Gnsin, Wikimedia Commons. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/File:TOYOTA_FCHV_Bus.jpg. License: CC-BY-SA.

चित्र-14 : बाज़ार में आई ईंधन-सेल से चलने वाली पहली कार।
Credits: Turbo-myu-z (modified by Mariordo), Wikimedia Commons. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Toyota_mirai_trimmed.jpg. License: CC-BY-SA.

है। चूँकि इस अभिक्रिया से कैथोड व ऍनोड के बीच मात्र 1.23 वोल्ट का विभवान्तर उत्पन्न होता है, सो पीवी सेलों की तर्ज पर अनेक ईंधन बैटरियों को एक मॉड्यूलर शैली में जोड़कर उच्च विभवान्तर प्राप्त किए जाते हैं।

$2H2 + O2 = 2H2O; \Delta G = - 237$ kJ mol-1; 1.23 V

परिवहन के लिए साफ़ ऊर्जा

पर्यावरण प्रदूषण में परिवहन उद्योग का बहुत बड़ा योगदान है, ख़ासकर शहरी क्षेत्रों में। चीन और भारत के शहरों में वाहनों से निकलने वाले उत्सर्जन अकसर सुर्ख़ियों छाए रहते हैं!

वाहन उत्सर्जनों में कमी लाने की व्यापक रणनीति में सार्वजनिक यातायात व्यवस्थाओं में सुधार लाना शामिल है और इसके तहत विद्युत वाहनों पर विचार किया जा रहा है। 1895 में थॉमस पार्कर मॉडल जैसी कुछ प्रारम्भिक कारें असल में बिजली से चलने वाली कारें ही थीं! सैद्धान्तिक रूप से विद्युत कारों के ये शुरुआती मॉडल वर्तमान में बनाई जा रही कारों से बहुत अलग नहीं हैं। दोनों ही री-चार्जेबल बैटरियों पर चलती हैं। बेशक़, आज की कारें हल्के वज़न वाले पदार्थों से बनी होती हैं और उनकी बैटरियाँ भी उच्च ऊर्जा घनत्व और दक्षता वाली होती हैं। विद्युत वाहनों में री-चार्जेबल बैटरियों की जगह ईंधन सेल का इस्तेमाल सम्भव है।

2011 तक ईंधन बैटरियों से चलने वाली कोई 100 बसें दुनिया भर में चल रही थीं। प्राकृतिक गैस या डीज़ल से चलने वाली बसों की तुलना में इनकी ईंधन कुशलता 39-141% अधिक थी (**चित्र-13**)। ऑटोमोबाइल क्षेत्र में ईंधन सेलों का प्रयोग अभी हाल की बात है – बाज़ार में पहला मॉडल 2015 में लाया गया था (**चित्र-14**)। वैसे ईंधन ख़र्च के मामले में ईंधन बैटरियों से चलने वाली कारें री-चार्जेबल बैटरियों से चलने वाली कारों जितनी ही किफ़ायती लगती हैं लेकिन री-चार्जेबल बैटरियों वाली कारों की रेंज थोड़ी कम होती है। मसलन, ईंधन-सेलों वाली 2016 मॉडल की एक कार की ईंधन कुशलता 28 किमी प्रति लीटर से ज़्यादा थी और उसकी रेंज कोई 500 किमी तक थी।

निष्कर्ष

ईंधन के बतौर हाइड्रोजन के इस्तेमाल का ख़्याल अभी नया-नया है। अन्य प्रौद्योगिकियों के समान, वास्तविकता बनने से पहले इसे अभी कई बाधाएँ पार करनी होंगी। मसलन, पूरी तरह से विद्युत-चालित या हाइब्रिड (मिली-जुली) कारों में ईंधन बैटरियों का प्रयोग अभी शुरू ही हो रहा है। इसके कई फ़ायदे हैं : ईंधन सेलों में ज़्यादा कार्यकुशल ऊर्जा-परिवर्तन, निशब्द परिचालन और शून्य जीएचजी उत्सर्जन। लेकिन अभी ये वाहन बहुत महँगे हैं। हालाँकि बड़े पैमाने पर उत्पादन के चलते प्रति इकाई लागत में कमी आएगी, साथ ही ज़्यादा सख़्त उत्सर्जन मानकों के अमल में आने के चलते, स्वच्छ ऊर्जा वाहनों के उत्पादन में लगने वाली अतिरिक्त लागत उचित ठहराई जा सकेगी।

बेशक़, हमारी ऊर्जा अर्थव्यवस्था का यह केवल एक क्षेत्र है। वायु प्रदूषण और जलवायु परिवर्तन से निपटने के लिए अन्य क्षेत्रों में भी ऐसे ही नवाचारों की ज़रूरत पड़ेगी।

Note: Credits for the image used in the background of the article title: Automobile exhaust by Ruben de Rijcke, Wikimedia Commons. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Automobile_exhaust_gas.jpg. License: CC-BY-SA.

ए.क्यू.कॉन्ट्रैक्टर आईआईटी मुम्बई के रसायनशास्त्र के भूतपूर्व प्रोफ़ेसर और ओमान की डोफ़र यूनिवर्सिटी के डीन हैं। उनसे aqcontractor@iitb.ac.inपर सम्पर्क किया जा सकता है।

अनुवाद : मनोहर नोतानी **पुनरीक्षण :** सुशील जोशी **कॉपी एडिटर :** अनुज उपाध्याय