

हाइड्रोजन - भविष्य का हरित ईंधन

आयोडीन-सल्फर ताप-रसायनिक प्रक्रिया से हाइड्रोजन उत्पादन



एच. जेड. फ़ानी और डॉ. ए. श्रीनिवास राव

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

भारत वर्तमान में चीन और संयुक्त राज्य अमेरिका के बाद विश्व का तीसरा सबसे बड़ा ऊर्जा उपभोक्ता देश है। बढ़ते औद्योगिकीकरण, शहरीकरण और विद्युतीकरण के कारण ऊर्जा की मांग में निरंतर वृद्धि हो रही है। हालांकि, वैश्विक औसत की तुलना में भारत की प्रति व्यक्ति ऊर्जा खपत अभी भी कम है, जो भविष्य में विकास की व्यापक संभावनाओं को दर्शाती है। वर्तमान में, देश की कुल विद्युत उत्पादन क्षमता का लगभग 55-60% हिस्सा कोयला-आधारित तापीय संयंत्रों से प्राप्त होता है, जो ऊर्जा सुरक्षा में कोयले की प्रधानता को रेखांकित करता है। दुनिया के पाँचवें सबसे बड़े कोयला भंडार भारत में ही हैं, जिसके चलते देश अपनी वर्तमान ऊर्जा आवश्यकताओं के लिए मुख्यतया इसी स्रोत पर निर्भर है। परिवहन और औद्योगिक क्षेत्रों के लिए आवश्यक कच्चे तेल की 30-35% हिस्सेदारी के लिए भारत भारी मात्रा में आयात पर निर्भर है, जबकि कुल विद्युत उत्पादन में प्राकृतिक गैस का योगदान लगभग 6-7% है। संक्षेप में, भारत की वर्तमान ऊर्जा आवश्यकताओं का 85-90% हिस्सा जीवाश्म ईंधनों (कोयला, तेल और गैस) से ही प्राप्त होता है, जो देश की ऊर्जा सुरक्षा में इनकी निर्णायक भूमिका को दर्शाता है।

भारत में कार्बन उत्सर्जन को कम करने और ऊर्जा विविधता के राष्ट्रीय लक्ष्यों को प्राप्त करने के लिए नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों का तेजी से विस्तार हो रहा है। वर्तमान में, भारत विश्व के शीर्ष सौर ऊर्जा उत्पादकों में शामिल है, जहाँ कुल विद्युत उत्पादन में सौर ऊर्जा की हिस्सेदारी 10-12% है। इसी तरह, भारत अपनी कुल बिजली आपूर्ति में 8-10% पवन ऊर्जा अंश के साथ दुनिया का चौथा सबसे बड़ा पवन ऊर्जा उत्पादक है। जलविद्युत एवं बायोमास-आधारित ऊर्जा का

योगदान भी क्रमशः 12-15% एवं 2-3% है। जीवाश्म ईंधनों की सीमित उपलब्धता और उनसे होने वाले प्रदूषण एवं कार्बन उत्सर्जन की चुनौतियों को देखते हुए, परमाणु ऊर्जा जैसे स्वच्छ और उच्च क्षमता वाले प्राथमिक ऊर्जा स्रोतों की आवश्यकता अब निरंतर बढ़ रही है।

गैर-नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों की सीमित उपलब्धता ने स्वच्छ और टिकाऊ विकल्पों की मांग भी बढ़ा दी है। इस दिशा में हाइड्रोजन एक प्रमुख ऊर्जा वाहक के रूप में उभरा है। वर्तमान में, कुल उत्पादित हाइड्रोजन का 85-90% हिस्सा उर्वरक उत्पादन और पेट्रोलियम के परिष्करण (रिफाइनिंग) में उपयोग होता है, जबकि शेष 10% धातुकर्म (मेटलर्जी) और ईंधन के रूप में प्रयुक्त होता है। परिवहन क्षेत्र में यह ईंधन सेल (फ्यूल सेल) के साथ मिलकर प्रदूषण कम करने का एक बड़ा माध्यम बन सकता है। हाइड्रोजन के उत्पादन को प्रयुक्त ऊर्जा स्रोत और रसायनिक प्रक्रिया के आधार पर विभिन्न श्रेणियों में वर्गीकृत किया गया है।

वर्तमान में, हाइड्रोजन (H_2) उत्पादन के लिए 'भाप मीथेन अभिक्रिया', जिसे 'स्टीम मीथेन रिफॉर्मिंग' भी कहते हैं, सबसे व्यापक एवं व्यावसायिक रूप से प्रयुक्त तकनीक है। इस प्रक्रिया में प्राकृतिक गैस से हाइड्रोजन प्राप्त की जाती है। किन्तु, इस प्रक्रिया में भारी मात्रा में कार्बन डाइऑक्साइड (CO_2) उत्सर्जित होती है, जो पर्यावरण की दृष्टि से गंभीर चुनौती है। इस समस्या को कम करने के लिए 'कार्बन प्रग्रहण एवं पृथक्करण' (कार्बन कैप्चर एंड सीक्वेस्ट्रेशन; CCS) तकनीकों का विकास भी किया जा रहा है, ताकि उत्सर्जित CO_2 को पृथक् कर सुरक्षित रूप से संग्रहित किया जा सके।

'हरित हाइड्रोजन', जिसे 'ग्रीन हाइड्रोजन' भी कहते हैं, भविष्य के लिए ऊर्जा का स्वच्छ एवं टिकाऊ विकल्प माना जा रहा है। नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों द्वारा प्राप्त बिजली के उपयोग द्वारा जल के विद्युत अपघटन से उत्पादित होने से इसे 'हरित हाइड्रोजन' कहते हैं। इस प्रक्रिया में सौर, पवन तथा जल विद्युत जैसी स्वच्छ ऊर्जा का उपयोग किया जाता है, जिससे कार्बन उत्सर्जन नगण्य रहता है। इसके अतिरिक्त, बायोमास, शैवाल तथा बैक्टीरिया-आधारित जैविक प्रक्रियाएं भी पर्यावरण-अनुकूल हाइड्रोजन उत्पादन के उभरते हुए महत्वपूर्ण स्रोत हैं। सौर (सोलर) हाइड्रोजन का उत्पादन प्रकाश-विद्युतरसायनिक सेल (फोटो-इलेक्ट्रोकेमिकल सेल; PECC) के माध्यम से किया जाता है, जिसमें सौर ऊर्जा के उपयोग से जल के अणुओं को हाइड्रोजन और ऑक्सीजन में विभाजित किया जाता है। यह तकनीक स्वच्छ ऊर्जा उत्पादन की दिशा में अत्यंत महत्वपूर्ण मानी जाती है।

जल से हाइड्रोजन प्राप्त करने के लिए विभिन्न ऊष्मा-रसायनिक (थर्मो-केमिकल) प्रक्रियाओं का भी अध्ययन किया जा रहा है। इनमें कॉपर-क्लोरीन (Cu-Cl) तथा जिंक (Zinc) आधारित ऊष्मा-रसायनिक चक्र अपनी उच्च दक्षता एवं सौर तथा परमाणु ऊर्जा के साथ अनुकूलता के कारण विशेष महत्व रखते हैं। वहीं, संकर-गंधक (हाइब्रिड-सल्फर) प्रक्रिया में सल्फर डाइऑक्साइड (SO_2) और जल की सहायता से हाइड्रोजन एवं ऑक्सीजन का उत्पादन किया जाता है। ये विकल्प भविष्य की स्वच्छ ऊर्जा तकनीकों में महत्वपूर्ण भूमिका निभा सकते हैं। बड़े पैमाने पर हाइड्रोजन उत्पादन के लिए 'आयोडीन-गंधक प्रक्रिया' अथवा 'आयोडीन-सल्फर (I-S) प्रक्रिया, ऊष्मा-रसायनिक बंद-चक्र (थर्मो-केमिकल क्लोज सायकल) तकनीकों में प्रमुख एवं गहन रूप से अध्ययन की गई प्रक्रियाओं में से एक है। इस प्रक्रिया में गंधक (सल्फर; S) और आयोडीन (I) की सहायता से जल (H_2O) को हाइड्रोजन (H_2) और ऑक्सीजन (O_2) में विभाजित किया जाता है। इसकी सबसे महत्वपूर्ण विशेषता यह है कि पूरी प्रक्रिया द्रव अवस्था (लिक्विड फेज़) में

संचालित होती है, जिससे ऊर्जा की हानि कम होती है तथा प्रक्रिया की ऊष्मागतिकीय दक्षता (थर्मोडायनेमिक एफिशिएंसी) अधिक रहती है। इसी कारण, इसे आर्थिक रूप से व्यवहार्य एवं पर्यावरण के अनुकूल तकनीक माना जाता है।

आयोडीन-सल्फर (I-S) प्रक्रिया तीन चरणों में कार्य करती है जिन्हें (1) बन्सन-अभिक्रिया, (2) सल्फ्यूरिक अम्ल अपघटन तथा (3) हाइड्रोआयोडिक अम्ल अपघटन चरण द्वारा जाना जाता है। प्रथम चरण में सल्फर डाइऑक्साइड (SO_2), आयोडीन (I_2) और जल की अभिक्रिया कराई जाती है, जिससे हाइड्रोआयोडिक अम्ल (HI) और सल्फ्यूरिक अम्ल (H_2SO_4) के जलीय विलयन प्राप्त होते हैं। जल एवं आयोडीन की अधिकता के कारण अभिक्रिया उत्पाद दो अलग-अलग प्रावस्थाओं में विभाजित हो जाते हैं, जिससे इनके पृथक्करण में सुविधा होती है। पृथक्करण के पश्चात हाइड्रोआयोडिक (HI) अम्ल से अतिरिक्त आयोडीन (I_2) को हटाया जाता है तथा हाइड्रोआयोडिक अम्ल (HI) को लगभग 450°C तापमान पर विघटित किया जाता है, जिससे हाइड्रोजन गैस (H_2) तथा आयोडीन (I_2) प्राप्त होते हैं। दूसरी ओर, सल्फ्यूरिक अम्ल (H_2SO_4) को लगभग 850°C तापमान पर विघटित किया जाता है, जिससे ऑक्सीजन (O_2), सल्फर डाइऑक्साइड (SO_2) और जल (H_2O) प्राप्त होते हैं। प्राप्त आयोडीन (I_2) और सल्फर डाइऑक्साइड (SO_2) को पुनः बन्सन रिएक्टर में भेज दिया जाता है, जिससे यह प्रक्रिया एक कुशल 'बंद-पाश' (क्लोज्ड-लूप) प्रणाली के रूप में कार्य करती है।

आयोडीन-सल्फर (I-S) प्रक्रिया की सबसे बड़ी विशेषता यह है कि इसमें केवल जल और ऊष्मा की खपत होती है, जबकि उत्पाद के रूप में स्वच्छ हाइड्रोजन एवं ऑक्सीजन प्राप्त होते हैं। साथ ही, इस प्रक्रिया को परमाणु एवं सौर ऊर्जा जैसे उच्च-ताप स्रोतों के साथ भी प्रचालित किया जा सकता है। इसलिए, I-S प्रक्रिया को भविष्य की स्वच्छ, टिकाऊ और कार्बन-मुक्त ऊर्जा प्रणाली के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण तकनीक माना जाता है।

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र (BARC) द्वारा वायुमंडलीय दबाव पर प्रचालित, 150 नॉर्मल लीटर प्रति घंटा (NLPH) क्षमता वाली, कांच से निर्मित (ग्लास सिस्टम) बंद-चक्रीय (क्लोज़्ड-सायकल) आयोडीन-सल्फर (I-S) प्रक्रिया प्रणाली का सफल प्रदर्शन किया गया है जो एक महत्वपूर्ण उपलब्धि है। इस तकनीक को औद्योगिक स्तर पर ले जाने के लिए अत्याधुनिक नियंत्रण प्रणालियों और उपकरणों से युक्त, धात्विक संरचनात्मक पदार्थों से निर्मित संयंत्र (मेटल-बेस्ड प्लांट) विकसित किया जा रहा है। इस क्रम में, 3000 नॉर्मल लीटर प्रति घंटा (NLPH) की विशाल क्षमता वाला एक प्रायोगिक संयंत्र (पायलट प्लांट) स्थापित किया जा रहा है, जिसका पूर्ण प्रदर्शन वर्ष 2027 तक निर्धारित है। यह परियोजना भारत के हरित हाइड्रोजन उत्पादन को बड़े पैमाने

पर व्यावहारिक बनाने की दिशा में एक निर्णायक कदम है।

इसके अतिरिक्त, एक संशोधित आयोडीन-सल्फर (IS) प्रक्रिया के विकास पर भी व्यापक शोध किया जा रहा है, जिसका उद्देश्य हाइड्रोजन के साथ-साथ सल्फ्यूरिक अम्ल (H_2SO_4) को सह-उत्पाद के रूप में प्राप्त करना है। यह औद्योगिक दृष्टि से अति-महत्वपूर्ण है, क्योंकि उर्वरक, पेट्रोकेमिकल, धातु प्रसंस्करण तथा रिफाइनिंग जैसे उद्योगों में सल्फ्यूरिक अम्ल की अत्यधिक मांग रहती है। हाइड्रोजन उत्पादन के साथ, उपयोगी अन्य रसायनों का सह-उत्पादन, प्रक्रिया की आर्थिक व्यवहार्यता और औद्योगिक उपयोगिता बढ़ा देता है। इसी दिशा में, औद्योगिक भागीदारों के सहयोग से अनुसंधान कार्य जारी है तथा इस नयी तकनीक से सम्बंधित दो पेटेंट भी दर्ज किए जा चुके हैं।

आभार

लेखकगण इस लेख की संरचना में प्रत्यक्ष एवं परोक्ष रूप से सहयोग एवं मार्गदर्शन देने वाले सभी व्यक्तियों विशेषकर श्री एम. एस. देशपांडे, उत्कृष्ट वैज्ञानिक, रसायनिक प्रौद्योगिकी वर्ग, भापअ केंद्र और डॉ. वी. नफीस अहमद, वैज्ञानिक अधिकारी-जी, रसायनिक प्रौद्योगिकी प्रभाग, भापअ केंद्र से प्राप्त सतत समर्थन के लिए कृतज्ञतापूर्वक आभार व्यक्त करते हैं।



लेखकगण का परिचय



श्री एच ज़ेड फ़ानी



डॉ. ए. श्रीनिवास राव

श्री एच ज़ेड फ़ानी, वैज्ञानिक अधिकारी-एफ और डॉ. ए. श्रीनिवास राव, वैज्ञानिक अधिकारी-एच वर्तमान में, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के रसायनिक प्रौद्योगिकी प्रभाग में कार्यरत हैं।