विकिरण प्रौद्योगिकी के सामाजिक अनुप्रयोग

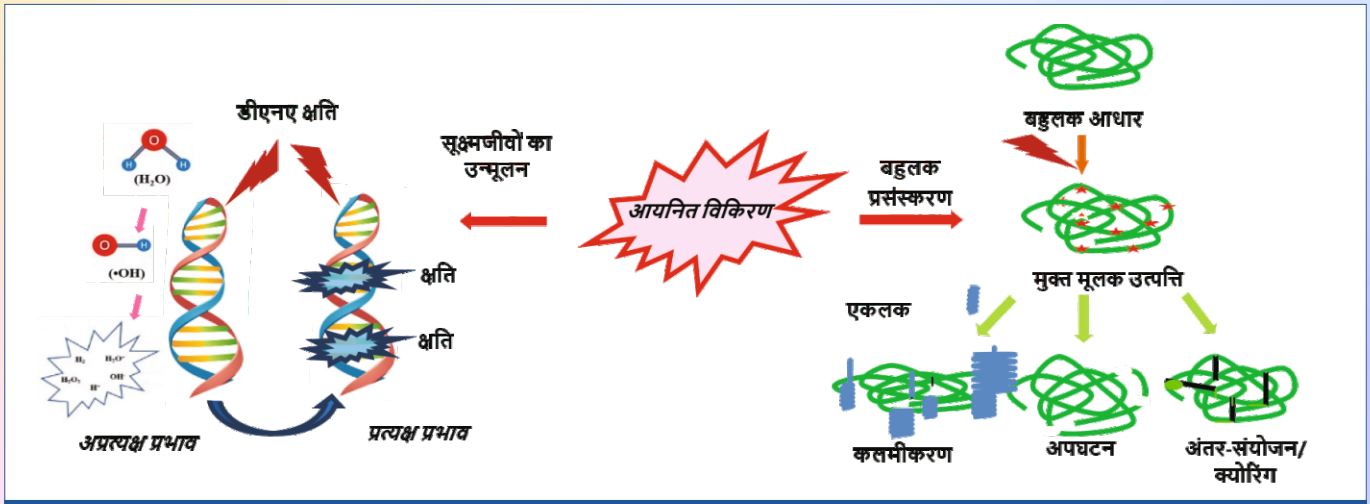
नरेंद्र कुमार गोयल और नीलांजल मिश्रा

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

नाभिकीय प्रौद्योगिकी और उसमें भी विशेष रूप से विकिरण प्रौद्योगिकियों के सामाजिक अनुप्रयोग, सभी के आकर्षण एवं विचार-विमर्श के विषय रहे हैं। जन-सामान्य के कल्याण की बात हो तो यह आकर्षण और भी बढ़ जाता है। विकिरण के उपयोगों को लेकर जो भ्रांतियाँ जन-मानस में फ़ैली हुई हैं, वे पूर्ण रूप से तथ्यहीन हैं एवं अनावश्यक डर और शंका उत्पन्न करती हैं। परमाणु ऊर्जा के क्षेत्र में कार्यरत वैज्ञानिकों एवं विद्वानों ने दशकों के अपने अथक प्रयासों द्वारा इन भ्रांतियों को दूर करने में उल्लेखनीय सफलता पाई है। इन प्रयासों द्वारा जन-सामान्य को विकिरण प्रौद्योगिकियों के अनुप्रयोगों में पालन किए जाने वाले सभी सुरक्षा मानकों के बारे में अवगत कराने का निरंतर प्रयास किया गया है। साथ ही यह भी स्पष्ट किया गया है कि ये प्रौद्योगिकियां आर्थिक लाभ के साथ-साथ समाज के समग्र विकास हेतु बहु-उपयोगी हैं। नाभिकीय एवं विकिरण प्रौद्योगिकियों ने विभिन्न क्षेत्रों जैसे कि ऊर्जा, स्वास्थ्य सेवाएं, कृषि, उद्योग, पर्यावरण संरक्षण, इत्यादि में अपनी उपादेयता प्रदर्शित की है। प्रस्तुत लेख पिछले तीन दशकों में, विशेषतः पर्यावरण, स्वास्थ्य सेवाओं और उद्योग के क्षेत्रों में विकिरण प्रौद्योगिकियों के प्रभावशाली उपयोगों पर प्रकाश डालता है।

क्या है विकिरण प्रौद्योगिकी?

उच्च ऊर्जा आयनकारी (आयोनाइज़िंग) विकिरणों (इलेक्ट्रॉन, गामा एवं एक्स-किरणों, इत्यादि) को विभिन्न पदार्थों जैसे कि बहुलकों (पॉलिमर्स) पर नियंत्रित, स्वच्छ एवं प्रभावी तरीके से उपयोग करके, इन पदार्थों के गुणधर्मों को संशोधित करने अथवा / एवं उनमें वांछित गुणों / लक्षणों को उत्पन्न करने की प्रक्रिया को सामान्य रूप से विकिरण प्रौद्योगिकी कहा जाता है। ऊष्मीय अथवा रसायनिक उपचारों के विपरीत, आयनकारी विकिरणें किसी भी पदार्थ में अपेक्षाकृत समान रूप से अधिक गहराई तक पहुंचती हैं। परिणामतः, विविध प्रकार की विकिरण-जन्य प्रक्रियाओं के द्वारा पदार्थों में परमाण्विक / आण्विक स्तर पर लाभकारी संरचनात्मक परिवर्तन लाए जा सकते हैं, जिन्हें प्रतीकात्मक



चित्र 1. पदार्थों पर आयनकारी विकिरणों के कुछ प्रभाव एवं प्रक्रियाएं (प्रतीकात्मक विवरण)

रूप से चित्र-1 में दिखाया गया है।

विकिरण प्रक्रियाओं के सुरक्षित क्रियान्वयन द्वारा, विभिन्न सामाजिक लाभों के लिए उन्नत तकनीकों का विकास किया गया है। चिकित्सा उपकरणों / संसाधनों का सम्पूर्ण रोगाणुनाशन (स्टरलाईज़ेशन), मलजल (सीवेज) का कीटाणुशोधन, सुरक्षित एवं टिकाऊ खाद्य पैकेजिंग विचरन, जल-शुद्धिकरण हेतु प्रयुक्त अधिशोषक (एडसोर्बेन्ट) एवं निस्यंदक (फिल्टर), इत्यादि इनके कुछ प्रमुख उदाहरण हैं।

विकिरण प्रौद्योगिकियों के पर्यावरणीय अनुप्रयोग

औद्योगिक क्रांति की शुरूआत से ही वैश्विक स्तर पर जहां एक ओर बहुआयामी विकास के द्वारा जन-सामान्य के जीवन में व्यापक लाभकारी प्रभाव हुए और करोड़ों लोगों को गरीबी और भूख से राहत मिली, वहां साथ ही साथ, पर्यावरण पर इसका गहरा एवं विपरीत प्रभाव भी पड़ा। अंधाधुंध शहरीकरण, जीवाश्म ईंधनों के अत्यधिक दोहन और जनसंख्या विस्फोट, इन सभी कारकों ने पर्यावरण प्रदूषण में भारी योगदान दिया है। वायु, जल और मिट्टी जैसे मूलभूत संसाधन भयावह रूप से प्रदूषित हो रहे हैं। ऐसे में यह अत्यावश्यक है कि पर्यावरण प्रदूषण नियंत्रण हेतु हरित एवं संधारणीय (सस्टेनेबल) तकनीकों को अपनाया जाए जिनसे प्रदूषण नियंत्रण के साथ-साथ प्राकृतिक संसाधनों को पुनर्जीवित भी किया जा सके। इस दिशा में, पर्यावरण संरक्षण हेतु एक रक्षक की भूमिका निभाते हुए, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र द्वारा जल एवं भूमि संसाधनों को सुरक्षित रखने के लिए विकिरण-आधारित नवीन तकनीकों का विकास किया है।

अपशिष्ट जल प्रशोधन (वस्त्र / कपड़ा उद्योग) हेतु विकिरण प्रौद्योगिकी

कपड़ा उद्योग, विशेषतः कपास और सेल्युलोस-आधारित (विस्कोस) उद्योगों के विभिन्न प्रसंस्करण (प्रोसेसिंग) चरणों जैसे रंगाई, छपाई, धुलाई और परिष्करण (फिनिशिंग), इत्यादि प्रक्रियाओं में जल का अत्यधिक मात्रा में उपयोग किया जाता है। इन चरणों में बड़ी मात्रा में कृत्रिम रंगों / रसायनों से युक्त अपशिष्ट जल उत्पन्न होता है, जो पर्यावरण के लिए अत्यंत हानिकारक है। इस प्रकार के अपशिष्ट जल को कम से कम लागत में, हरित एवं सतत रूप में प्रशोधित किया जाना अत्यावश्यक है, ताकि प्रशोधित जल का पुनःउपयोग किया जा सके। अपशिष्ट जल प्रशोधन, जल खपत की दैनिक मात्रा में कमी लाने के साथ-साथ, मौजूदा जल-संसाधनों के संरक्षण में भी सहायक है। भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र द्वारा विकिरण प्रौद्योगिकी के उपयोग से अपशिष्ट जल में से रंजक (डाई) अणुओं को अधिशोषित करने के लिए बहुलक (पॉलिमर्स)-आधारित विशेष फिल्टर विकसित किए गए हैं। इस स्वदेशी तकनीक को बड़े पैमाने पर अपनाया और कार्यान्वित भी किया गया है। इस प्रौद्योगिकी में विकिरण उपचार द्वारा सूत (कपास) पर आधारित अधिशोषक फिल्टर कार्ट्रिज विकसित किए गए हैं, जो वस्त्र उद्योग से जनित अपशिष्ट जल में उपस्थित आयनिक रंजकों (रंगों) को हटाने में सक्षम हैं। इन फिल्टर कार्ट्रिज में काम में लाया गया सूत (कपास) सेल्यूलोज़-आधारित जैव-अपघटनीय (बायोडिग्रेडेबल) पदार्थ है जिसके फ़िल्टर कार्ट्रिज के उपयोग काल समाप्त होने के बाद अंततः निष्पादन में किसी प्रकार की कठिनाई नहीं होगी। यह फ़िल्टर प्रौद्योगिकी की अपेक्षा अतिलाभदायक है।

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र द्वारा विकसित यह स्वदेशी तकनीक सूती एवं विस्कोस-आधारित वस्त्र उद्योग के लिए अत्यंत उपयोगी एवं पर्यावरणीय रूप से अनुकूल है। औद्योगिक परिस्थितियों में किए गए व्यापक परीक्षणों के बाद, जोधपुर (राजस्थान) में स्थित एक वस्त्र उद्योग इकाई में इस प्रौद्योगिकी पर आधारित 75 किलो लीटर प्रति दिन (KLD) क्षमता वाला एक परीक्षण प्रशोधन संयंत्र स्थापित किया गया है (चित्र 2)। यह संयंत्र इस प्रौद्योगिकी में रुचि रखने वाले उद्योगों एवं विभिन्न नियामक निकायों जैसे कि प्रदूषण नियंत्रण बोर्ड के समक्ष प्रदर्शन इकाई के रूप में और देश के अन्य भागों में इस प्रौद्योगिकी के प्रचार-प्रसार हेतु कार्यरत है। रंगीन अपशिष्ट जल को पुनः उपयोगी औद्योगिक

चित्र 2. वस्त्र उद्योग जनित अपशिष्ट जल प्रशोधन हेतु विकिरण प्रौद्योगिकी का अनुप्रयोग

जल में परिवर्तित करने से (1) उद्योग हेतु ताज़े जल (मीठे जल) की खपत में उल्लेखनीय कमी आती है, (2) सामान्य (केंद्रीय) अपशिष्ट उपचार संयंत्रों (CETPs) पर कम दबाव पड़ता है, (3) भूजल के दोहन में कमी आती है, एवं (4) बहुमूल्य जल संसाधनों पर अतिरिक्त बोझ डाले बिना भी सतत औद्योगिक विकास को बढ़ावा मिलता है।

मलपंक (सीवेज स्लज) प्रशोधन के लिए विकिरण प्रौद्योगिकी

घरेलू मलजल को सीवेज उपचार संयंत्र (एसटीपी) से गुज़ारने के बाद शेष बचे अर्ध-ठोस मलबे को मलपंक (आपंक अथवा सीवेज स्लज) कहा जाता है। भारत में प्रतिवर्ष लगभग 19 लाख मीट्रिक टन सूखा मलपंक उत्पन्न होता है। कार्बन-बाहुल्य यह मलपंक पेड़-पौधों के लिए पोषक तत्वों का अच्छा स्रोत है, मगर अपने यथारूप में यह विविध प्रकार के जीवाणुओं (बैक्टीरिया) एवं रोगजन्य सूक्ष्मजीवों से संदूषित होता है। बिना किसी नियंत्रण, परीक्षण या उपचार से पहले इसके कृषिभूमि में उपयोग से यह विभिन्न रोगों के प्रसार और भूजल-प्रदूषण का कारण बन सकता है।

मलपंक को उच्च ऊर्जा गामा विकिरणों से किरणित कराने पर इसमें उपस्थित हानिकारक सूक्ष्मजीवों एवं जीवाणुओं को सफलतापूर्वक नष्ट किया जा सकता है। इस प्रक्रिया को विकिरण आपंक-स्वच्छन (रेडिएशन स्लज हाइजीनाइजेशन) कहा जाता है। जीवाणुओं/ रोगाणुओं को नष्ट करने के अतिरिक्त, गामा किरणन द्वारा आपंक में मौजूद कार्बनिक प्रदूषकों जैसे कि पॉलीएरोमैटिक हाइड्रोकार्बन का निम्नन (डीग्रेडेशन) भी किया जा सकता है। इस प्रकार, यह तकनीक आपंक को कृषि उपयोग हेतु सुरक्षित बनाने का एक प्रभावी उपाय है। भारत में इस तकनीक का पहला प्रदर्शन संयंत्र वर्ष 1992 में वड़ोदरा (गुजरात) में स्थापित किया गया, जहां लगभग 4 से 5 % ठोस पदार्थ युक्त तरल आपंक का स्वच्छन (हाइजीनाइजेशन) एवं प्रशोधन किया जाता है। विकिरण प्रशोधित आपंक गंधहीन होता है। यह कार्बन एवं पेड़-पौधों हेतु आवश्यक पोषक तत्वों से युक्त होने के कारण फसल की पैदावार बढ़ाने में उपयोगी है।

वड़ोदरा स्थित संयंत्र के बाद, स्थानीय नगर निगमों के सहयोग से वर्ष 2019 एवं 2022 में क्रमशः अहमदाबाद (गुजरात) और इंदौर (मध्य प्रदेश) में 75-80 % ठोस पदार्थ युक्त सूखे आपंक को प्रशोधित करने वाले उच्च दक्षता के दो नए संयंत्र स्थापित किए गए हैं (चित्र 3)। वर्तमान में ये संयंत्र सफलतापूर्वक संचालित हैं। विकिरण-आधारित यह स्वच्छ तकनीक, भारत सरकार की स्मार्ट वेस्ट मैनेजमेंट और सतत कृषि पद्धतियों को विकसित करने की दिशा में किए जा रहे प्रयासों के लिए एक प्रोत्साहनीय विकल्प हैं।

चित्र 3. मलजल आपंक के कीटाणुनाशक प्रशोधन में विकिरण प्रौद्योगिकी का उपयोग

स्वास्थ्य सेवाओं में विकिरण प्रौद्योगिकी के अनुप्रयोग

घावों के उपचार हेतु विकिरण-प्रसंस्कृत पट्टी (ड्रेसिंग):

जलने से होने वाले घाव एक गंभीर स्वास्थ्य समस्या हैं। दुनिया भर में प्रतिवर्ष लगभग एक करोड़ से भी अधिक लोग जलने का शिकार होते हैं, जिन्हें सही एवं सुगम चिकित्सकीय देखभाल की आवश्यकता होती है। इस प्रकार के घावों के उपचार के लिए लंबे समय से पारंपरिक पट्टियों (ड्रेसिंग) का उपयोग किया जाता रहा है, जो कई प्रकार की कमियों जैसे कि पट्टी का घाव से चिपकना, घाव-प्रभावित क्षेत्र का सूख जाना और, सूक्ष्मजीवी संक्रमण के जोखिम, इत्यादि से युक्त हैं। इन कमियों को दूर करने के लिए, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र द्वारा विकिरण-तिर्यकबद्ध (रेडिएशन-क्रॉसलिंक्ड) बहुलक, जिसे हाइड्रोजेल कहा जाता है पर आधारित एक विशेष घाव-उपचार पट्टी (ड्रेसिंग) विकसित की है। इसका उपयोग जलने की गंभीर चोटों के साथ-साथ मधुमेह-जनित घावों, बिस्तर के घावों (बेड-सोर्स), और पशुओं के काटने से मिली चोटों के उपचार में भी किया जा सकता है। विकिरण प्रौद्योगिकी के द्वारा इन उत्पादों का निर्माण एवं कीटाणुशोधन (निर्जर्मीकरण/स्टरलाईज़ेशन) एक साथ ही किया जाता है (चित्र 4)।

यह हाइड्रोजेल पट्टी (ड्रेसिंग), जैव-विघटनीय एवं गैर-विषाक्त बहुलक (जैसे कि पॉलीविनाइल अल्कोहॉल) और बहुशर्करा (पॉलीसैकेराइड, जैसे कि एगर) के मिश्रण को किरणित करके तैयार की जाती है। इन पारदर्शी बहुलक पट्टियों में अधिकांशतः (लगभग 90%) पानी होता है, जिससे यह घाव/चोट से चिपके बिना उसे सुगम रूप से ठंडा बनाए रखती है। संक्रमण के इलाज और शीघ्र घाव भरने के लिए, इन पट्टियों में जल में विलयशील औषधियां भी मिलाई जा सकती हैं। सफल चिकित्सकीय परीक्षणों के बाद यह प्रौद्योगिकी कई स्वास्थ्य सेवा कंपनियों को हस्तांतरित की गयी है।

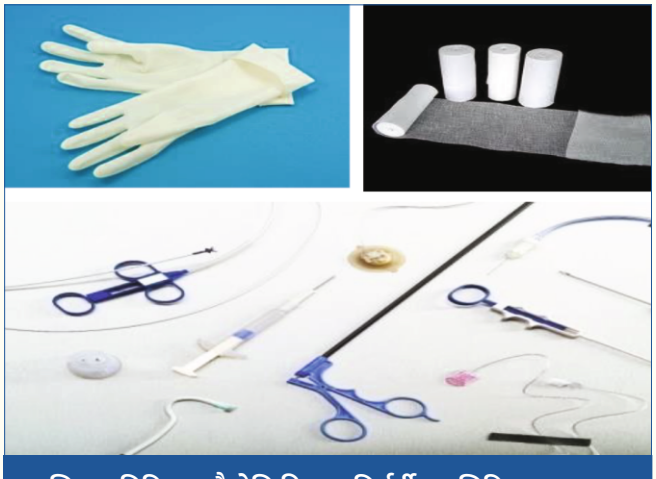
विकिरण प्रौद्योगिकी द्वारा चिकित्सा उत्पादों का निर्जर्मीकरण (स्टरलाईज़ेशन)

किसी पदार्थ को सभी हानिकारक सूक्ष्मजीवों से पूरी तरह मुक्त कर देना ही निर्जर्मीकरण (स्टरलाईज़ेशन) कहलाता है। चिकित्सा उत्पादों जैसे कि सर्जिकल दस्ताने, सूइयाँ, टांके, कैथेटर, प्रत्यारोपणों (इम्प्लांट्स), इत्यादि के लिए यह प्रक्रिया अत्यावश्यक है, क्योंकि इन उत्पादों में सूक्ष्मजीवों की थोड़ी-सी भी उपस्थिति शरीर में संक्रमण फैला सकती है और यहां तक की गंभीर मामलों में रोगी की मृत्यु का कारण भी बन सकती है। पारंपरिक तरीकों जैसे कि ऊष्मा-उपचार, एथिलीन ऑक्साइड से रसायनिक उपचार, इत्यादि से किए जा रहे निर्जर्मीकरण (स्टरलाईज़ेशन) में जो कमियां पायी गई हैं, उनमें असमान विसंक्रमण, शेष रह गई एथिलीन ऑक्साइड (जो कैंसर और उत्परिवर्तन उत्पन्न करने वाला

चित्र 4. विकिरण-प्रसंस्कृत हाइड्रोजेल-आधारित कीटाणुरहित घाव पट्टी (ड्रेसिंग)

संभावित कारक है) की विषाक्तता, निर्जर्मीकृत उत्पादों के पैकिंग के दौरान पुनःसंदूषण का खतरा, इत्यादि शामिल हैं। इन सभी कमियों को दूर करने के लिए, उच्च ऊर्जा विकिरणों (गामा किरणें, इलेक्ट्रॉन बीम) के उपयोग द्वारा प्रगत निर्जर्मीकरण तकनीक विकसित की गई है (चित्र 5)। विकिरण प्रौद्योगिकी द्वारा किये गए निर्जर्मीकरण के कई लाभ हैं जिनमें उच्च विश्वसनीयता, द्रुत प्रक्रिया, उत्पाद की अंतिम पैकेजिंग के पश्चात स्पर्शरहित निर्जर्मीकरण (ताकि पुनर्संदूषण की संभावना ना रहे) , निर्जमीकृत उत्पादों में विषैले रसायन अवशेषों की अनुपस्थिति, इत्यादि शामिल हैं।

भारत का प्रथम गामा विकिरण आधारित चिकित्सा उत्पादों



चित्र 5. विकिरण प्रौद्योगिकी द्वारा निर्जर्मीकृत चिकित्सा उत्पाद

का विसंक्रमण संयंत्र (आइसोमेड; ISOMED) भाभा परमाणु अनुसन्धान केंद्र द्वारा मुंबई में स्थापित किया गया जिसका प्रचालन वर्ष 1974 में प्रारंभ हुआ। कई दशकों के सफल प्रचालन के पश्चात इसे उन्नयित करके 22 अप्रैल, 2025 को ISOMED-2.0 के रूप में पुनः प्रचालित किया गया। चिकित्सा उत्पादों के निर्जर्मीकरण और स्वास्थ्य सेवा उद्योग को व्यापक सेवाएं प्रदान करने की दिशा में परमाणु ऊर्जा विभाग द्वारा देश में अनेकों व्यावसायिक विकिरण संयंत्रों की स्थापना को भी बढ़ावा दिया गया है।

विकिरण तकनीक के औद्योगिक अनुप्रयोग

विभिन्न उद्योगों में भी विकिरण तकनीकों की व्यापक उपादेयता है। उदाहरण के लिए, उच्च-ऊर्जा इलेक्ट्रॉन किरणपुंज त्वरक (इलेक्ट्रॉन बीम एक्सिलिरेटर) के उपयोग से विभिन्न पदार्थों जैसे कि रत्नों (जेमस्टोन्स), औद्योगिक बहुलकों (पॉलिमर्स), अर्धचालक (सेमीकंडक्टर) एवं प्रसंस्कृत खाद्य पदार्थों के गुणधर्मों में उन्नयन किया जाता है। इन त्वरकों से उत्पन्न उच्च-उर्जित इलेक्ट्रॉनों की उक्त पदार्थों से परस्परक्रिया के फलस्वरूप उनके गुणधर्मों में ऐसे कई लाभकारी परिवर्तन होते हैं, जिन्हें अन्य सामान्य / पारंपरिक प्रक्रियाओं से प्राप्त करना कठिन या अव्यवहार्य होता है (चित्र 6)। वर्ष 1982 में भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई में पहला व्यावसायिक इलेक्ट्रॉन किरणपुंज त्वरक (ILU-6) स्थापित किया गया । विभिन्न औद्योगिक अनुप्रयोगों के लिए आवश्यक प्रक्रियाओं और उत्पादों के अनुसंधान एवं विकास

कार्य में इस त्वरक का व्यापक रूप से उपयोग किया जा रहा है। रंगीन रत्नों का उत्पादन, तिर्यकबंधन (क्रॉसलिंकिंग) द्वारा उच्च गुणवत्ता युक्त बहुलक-आधारित तारों एवं केबलों का उत्पादन, टायरों, ओ-रिंग गैस्केटों, ऊष्मा-संकुचनीय (हीट-श्रिंकेबल) बहुलकों का निर्माण एवं भंडारण-अवधि (शेल्फ लाइफ) वृद्धि हेतु खाद्य पदार्थों का विकिरण प्रसंस्करण, आदि इनके उदाहरण हैं। उक्त सभी अनुप्रयोगों द्वारा वैश्विक बाज़ार में प्रतिस्पर्धनीय गुणवत्ता वाले उत्पादों का निर्माण संभव / सुगम हुआ है जो भारत की "मेक इन इंडिया" पहल को सशक्त बनाने में अग्रणी भूमिका निभा रहा है।

चित्र 6. औद्योगिक उत्पादों के विकास में विकिरण तकनीक (इलेक्ट्रॉन बीम) का उपयोग

आभार

लेखकगण, इस लेख की रचना में सहयोग एवं मार्गदर्शन के लिए डॉ. वीरेंद्र कुमार, अध्यक्ष, विकिरण प्रौद्योगिकी विकास प्रभाग, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के प्रति आभार प्रकट करते हैं।

लेखकगण का परिचय

नरेंद्र कुमार गोयल

डॉ. नरेंद्र कुमार गोयल, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के विकिरण प्रौद्योगिकी विकास प्रभाग (RTDD) में वैज्ञानिक अधिकारी-जी के पद पर कार्यरत हैं।

नीलांजल मिश्रा

डॉ. नीलांजल मिश्रा, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के विकिरण प्रौद्योगिकी विकास प्रभाग (RTDD) में वैज्ञानिक अधिकारी-एफ के पद पर कार्यरत हैं।