

TCVN

TIÊU CHUẨN QUỐC GIA

TCVN 7911:2008
ISO/ASTM 51276:2002

Xuất bản lần 1

TIÊU CHUẨN THỰC HÀNH SỬ DỤNG
HỆ ĐO LIỀU POLYMETHYLMETACRYLAT

Standard Practice for Use of a Polymethylmethacrylate
Dosimetry System

HÀ NỘI – 2008

Lời nói đầu

TCVN 7911:2008 hoàn toàn tương đương với ISO/ASTM 51276:2002;

TCVN 7911:2008 do Ban kỹ thuật tiêu chuẩn quốc gia TCVN/TC/F5 Vệ sinh thực phẩm và chiếu xạ biên soạn, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng đề nghị, Bộ Khoa học và Công nghệ công bố.

Tiêu chuẩn thực hành sử dụng hệ đo liều polymethylmetacrylat ¹⁾

Standard Practice for Use of a Polymethylmethacrylate Dosimetry System

1 Phạm vi áp dụng

1.1 Tiêu chuẩn này bao gồm các qui trình sử dụng các liều kế polymethylmetacrylat (PMMA) được hàn kín để đo liều hấp thụ trong các vật liệu được chiếu xạ bởi bức xạ photon hoặc điện tử dưới danh nghĩa là liều hấp thụ trong nước. Liều kế PMMA được xếp vào loại liều kế thông thường. Xem ISO/ASTM Guide 51261.

1.2 Tiêu chuẩn này bao gồm các hệ đo liều cho phép thực hiện các phép đo liều hấp thụ trong các điều kiện sau đây:

1.2.1 Dải liều hấp thụ từ 0,1 kGy đến 100 kGy.

1.2.2 Suất liều hấp thụ từ $1 \times 10^{-2} \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ đến $1 \times 10^7 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.2.3 Dải năng lượng bức xạ đối với các photon từ 0,1 MeV đến 50 MeV và đối với các electron từ 3 MeV đến 50 MeV.

1.2.4 Nhiệt độ chiếu xạ từ $-78 \text{ }^{\circ}\text{C}$ đến $+50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.3 Tiêu chuẩn này không đề cập đến tất cả các vấn đề liên quan đến an toàn. Trách nhiệm của người sử dụng tiêu chuẩn này là phải tự xác lập các tiêu chuẩn thích hợp về thực hành an toàn và sức khoẻ và xác định khả năng áp dụng các giới hạn luật định trước khi sử dụng.

¹⁾ Tiêu chuẩn thực hành này nằm trong phạm vi thẩm quyền của ASTM Ban E 10 Công nghệ và ứng dụng hạt nhân và thuộc trách nhiệm của Tiểu Ban E10.01 Đo liều quá trình bức xạ và cũng thuộc phạm vi thẩm quyền của ISO/TC 85/WG 3.

Ấn bản hiện hành được thông qua vào ngày 4 tháng 6 năm 2002, được xuất bản ngày 15 tháng 12 năm 2002, nguyên bản là ASTM E 1276-88. ASTM E 1276-96 được ISO thông qua vào năm 1998 với số hiệu tiêu chuẩn là ISO 15558:1998. Tiêu chuẩn ISO/ASTM 51276:2002 hiện hành là bản soát xét chính và thay thế ISO 15558.

2 Tài liệu viện dẫn

Các tài liệu viện dẫn sau là rất cần thiết cho việc áp dụng tiêu chuẩn này. Đối với các tài liệu viện dẫn ghi năm công bố thì áp dụng phiên bản được nêu. Đối với các tài liệu viện dẫn không ghi năm công bố thì áp dụng phiên bản mới nhất, bao gồm cả các sửa đổi.

2.1 Tiêu chuẩn ASTM

ASTM E 170 Terminology Relating to Radiation Measurements and Dosimetry (Thuật ngữ liên quan đến các phép đo bức xạ và đo liều)²⁾.

ASTME 178 Practice for Dealing with Outlying Observations (Thực hành đối với việc quan sát ở xa)³⁾.

ASTME 275 Practice for Describing and Measuring Performance of Ultraviolet, Visible, and Near Infrared Spectrophotometers (Thực hành sử dụng máy đo quang phổ tử ngoại, nhìn thấy và vùng gần hồng ngoại để mô tả và đo đạc)³⁾.

ASTM E 668 Practice for Application of Thermoluminescence-Dosimetry (TLD) Systems for Determining Absorbed Dose in Radiation-Hardness Testing of Electronic Devices (Thực hành đối với việc ứng dụng các hệ đo liều nhiệt huỳnh quang (TLD) để xác định liều hấp thụ trong việc thử nghiệm khả năng chịu bức xạ của các thiết bị điện tử)²⁾

ASTM E 1026 Practice for Using the Fricke Reference Standard Dosimetry System (Thực hành về cách sử dụng hệ liều kế chuẩn Fricke)²⁾.

2.2 Tiêu chuẩn ISO/ASTM

TCVN 7248:2008 (ISO/ASTM 51204:2004) Tiêu chuẩn thực hành đo liều áp dụng cho thiết bị chiếu xạ gamma dùng để xử lý thực phẩm²⁾.

TCVN 7913:2008 (ISO/ASTM 51401) Tiêu chuẩn thực hành sử dụng hệ đo liều dicromat.

ISO/ASTM 51205 Practice for Use of a Ceric-Cerous Sulfate Dosimetry System (Thực hành sử dụng hệ đo liều xeri-xerô sulphat)²⁾.

ISO/ASTM 51261 Guide for Selection and Calibration of Dosimetry Systems for Radiation Processing (Hướng dẫn lựa chọn và hiệu chuẩn các hệ đo liều trong công nghệ xử lý bằng bức xạ)²⁾.

ISO/ASTM 51400 Practice for Characterization and Performance of a High-Dose Radiation Dosimetry Calibration Laboratory (Thực hành xác định các đặc tính và chất lượng vận hành của phòng thử nghiệm hiệu chuẩn liều cao trong phép đo liều bức xạ)²⁾.

²⁾ Sổ tay tiêu chuẩn ASTM tập 12.02

³⁾ Sổ tay tiêu chuẩn ASTM tập 03.06

ISO/ASTM 51607 Practice for Use of the Alanine-EPR Dosimetry System (Thực hành sử dụng hệ đo liều cộng hưởng từ Alanin)²⁾.

ISO/ASTM 51631 Practice for Use of Calorimetric Dosimetry Systems for Electron Beam Dose Measurements and Dosimeter Calibrations (Thực hành sử dụng hệ đo liều nhiệt lượng trong đo liều chùm tia điện tử và hiệu chuẩn máy đo liều)²⁾.

ISO/ASTM 51707 Guide for Estimating Uncertainties in Dosimetry for Radiation Processing (Hướng dẫn đánh giá độ không đảm bảo đối với các phép đo liều trong công nghệ xử lý bằng bức xạ)²⁾.

2.3 Báo cáo của Cơ quan Quốc tế về các Đơn vị và các Phép đo liều bức xạ (ICRU)

ICRU Report 14 – Radiation Dosimetry: X-Rays and Gamma Rays with Maximum Photon Energies Between 0.6 MeV and 50 MeV (Báo cáo ICRU 14 – Đo liều bức xạ: tia X và gamma với năng lượng photon tối đa từ 0,6 MeV đến 50 MeV)⁴⁾.

ICRU Report 17 Radiation Dosimetry: X Rays Generated at Potentials of 5 to 150 kV (Báo cáo số 17 của ICRU về đo liều bức xạ: Đối với tia X được sinh ra tại các hiệu điện thế từ 5 kV đến 150 kV).

ICRU Report 34 The Dosimetry of Pulsed Radiation (Báo cáo ICRU 34 - Đo liều bức xạ xung).

ICRU Report 35 Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV (Báo cáo ICRU 35 – Đo liều bức xạ: Chùm tia điện tử có năng lượng từ 1 MeV đến 50 MeV).

ICRU Report 60 Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (Báo cáo ICRU 60 về định lượng cơ bản và các đơn vị bức xạ ion hoá).

3 Thuật ngữ và định nghĩa

3.1 Định nghĩa

3.1.1

Đường chuẩn (Calibration curve)

Biểu diễn bằng đồ thị hàm đặc trưng độ nhạy của hệ đo liều.

3.1.2

Thiết bị hiệu chuẩn (Calibration facility)

Sự kết hợp của một nguồn bức xạ ion hoá và dụng cụ đo liên quan có thể cung cấp được liều hấp thụ hoặc suất liều hấp thụ đồng nhất và có thể tái lập được liên kết chuẩn đo lường quốc gia hoặc quốc tế, tại một vị trí xác định và trong một vật liệu xác định và có thể được sử dụng để xác định hàm đặc trưng độ nhạy hoặc đường chuẩn của hệ đo liều.

⁴⁾ Ủy ban quốc tế về các phép đo và các đơn vị đo bức xạ (ICRU). 7910 Woodmont Ave., Bethesda, MD 20814, Mỹ.

3.1.3

Liều kế (Dosimeter)

Dụng cụ, khi bị chiếu xạ sẽ tạo ra sự thay đổi có thể định lượng được đối với một số đặc tính của dụng cụ, sự thay đổi này có thể liên quan đến liều hấp thụ trong vật liệu bằng cách sử dụng các thiết bị và phương pháp phân tích thích hợp.

3.1.4

Mẻ liều kế (Dosimeter batch)

Số liều kế được sản xuất từ một lượng vật liệu nhất định có thành phần đồng nhất, được chế tạo trên một dây chuyền sản xuất được khống chế theo các điều kiện nhất định và có mã nhận dạng thống nhất.

3.1.5

Độ nhạy liều kế (Dosimeter response)

Hiệu ứng bức xạ xảy ra trong liều kế có khả năng lặp lại và có thể định lượng ở liều hấp thụ đã cho

3.1.6

Liều kế dự trữ (Dosimeter stock)

Một phần của mẻ liều kế do người sử dụng lưu giữ.

3.1.7

Hệ số hấp thụ riêng trung bình (\bar{k}) (Mean specific absorbance, (\bar{k}))

Giá trị trung bình của độ hấp thụ k đối với một bộ liều kế được chiếu xạ với cùng liều hấp thụ, trong cùng điều kiện.

$$\bar{k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \quad (1)$$

trong đó:

n là số lượng liều kế; và

k_i là độ hấp thụ riêng của một liều kế.

3.1.8

Tính liên kết chuẩn đo lường (Measurement traceability)

Khả năng minh chứng bằng một chuỗi phép so sánh liên tục phép đo đều đạt giới hạn chấp nhận được về độ không đảm bảo đo so với chuẩn quốc gia hoặc chuẩn quốc tế được công nhận.

3.1.9

Liều kế polymethylmetacrylat (PMMA) [Polymethylmethacrylate (PMMA) dosimeter]

Mảnh vật liệu PMMA được chế tạo đặc biệt hoặc được chọn có khả năng tạo ra sự thay đổi về độ hấp thụ quang khi bị chiếu xạ, sự thay đổi đó như là hàm của liều hấp thụ và mỗi liều kế được hàn kín trong một túi bảo quản kín.

3.1.9.1 Thảo luận (Discussion)

Khi PMMA được lấy ra khỏi túi bảo quản thì nó vẫn được xem là một liều kế.

3.1.10**Liều kế chuẩn chính (Reference-standard dosimeter)**

Liều kế có chất lượng cao dùng như một liều kế chuẩn để cung cấp các phép đo chuẩn mà đã được xác nhận bởi phép đo dùng liều kế chuẩn đầu.

3.1.11**Độ nhạy (Response)**

Xem **Độ nhạy liều kế (3.1.5)**.

3.1.12**Hàm đặc trưng độ nhạy (Response function)**

Biểu thị mối quan hệ toán học giữa độ nhạy của liều kế và liều hấp thụ đối với hệ đo liều đó

3.1.13**Liều kế thường xuyên (Routine dosimeter)**

Liều kế được hiệu chuẩn dựa trên liều kế chuẩn đầu, chuẩn chính hoặc liều kế truyền chuẩn và được dùng để đo liều thường xuyên.

3.1.14**Sản phẩm tương tự (Simulated product)**

Vật liệu có mật độ và các đặc tính tán xạ giống với các đặc tính của sản phẩm được chiếu xạ.

3.1.14.1 Thảo luận (Discussion)

Sản phẩm tương tự được sử dụng để thay thế cho sản phẩm thực khi xác định đặc tính của máy chiếu xạ. Khi sử dụng bù vào sản phẩm còn thiếu khi chiếu xạ hàng ngày, thì sản phẩm tương tự còn được gọi là vật liệu thay thế. Khi dùng để đo biểu đồ phân bố liều, sản phẩm tương tự còn được gọi là "vật liệu giả".

3.1.15**Độ hấp thụ riêng (Specific absorbance)**

Tỉ số giữa độ hấp thụ quang, A_λ , tại bước sóng đã chọn và độ dài quang học, d , của vật liệu làm liều kế:

$$k = A_\lambda / d \quad (2)$$

3.1.15.1 Thảo luận (Discussion)

Trong tiêu chuẩn này, d là độ dày của liều kế (t). Nếu t là hằng số cần thiết (với sai số cho phép $\pm 1\%$) thì không cần tính toán độ hấp thụ riêng và độ hấp thụ A có thể được xem như là giá trị liều tương đối.

3.1.16

Liều kế truyền chuẩn (Transfer-standard dosimeter)

Thông thường là liều kế chuẩn chính thích hợp để vận chuyển từ các địa điểm khác nhau được sử dụng, để so sánh các phép đo liều.

3.2 Định nghĩa về các thuật ngữ khác dùng trong tiêu chuẩn này có liên quan đến phép đo bức xạ và đo liều có thể tham khảo ở tài liệu ASTM E 170. Định nghĩa trong E 170 phù hợp với ICRU 60, do đó, ICRU 60 có thể sử dụng làm tài liệu tham khảo thay thế.

4 Ý nghĩa và ứng dụng

4.1 Các hệ đo liều polymethylmetacrylat thường được sử dụng chủ yếu trong qui trình bức xạ công nghiệp, ví dụ trong khử trùng các dụng cụ y tế và trong chế biến thực phẩm. Trong những ứng dụng này, hầu hết mức liều hấp thụ nằm trong khoảng 0,1 kGy đến 100 kGy, đây chính là dải liều làm việc của hệ liều kế PMMA.

4.2 Các vật liệu liều kế PMMA được chọn thích hợp cho phép xác định được liều hấp thụ trong các chất tương đương nước, chẳng hạn như nhựa, bông, giấy, tơ và cao su. Các giá trị liều thường được biểu thị dưới dạng liều hấp thụ trong nước (xem 4.7). Dưới ảnh hưởng của bức xạ ion hoá, các phản ứng hoá học xảy ra trong vật liệu, sẽ tạo ra và/hoặc làm tăng dải hấp thụ trong vùng nhìn thấy và/hoặc vùng tia tử ngoại của phổ. Độ hấp thụ quang được xác định tại các bước sóng được chọn trong dải hấp thụ do bức xạ tạo nên này có liên quan định lượng tới liều bức xạ hấp thụ tương ứng. Ví dụ về các bước sóng thích hợp sử dụng để phân tích các liều kế cụ thể được nêu trong Bảng A.1.

4.3 Trong ứng dụng hệ đo liều cụ thể, liều hấp thụ thu được bằng cách sử dụng đường chuẩn hoặc hàm độ nhạy của liều kế. Đường chuẩn hoặc hàm độ nhạy có được bằng cách đo một bộ các liều kế được chiếu xạ với các giá trị liều hấp thụ đã biết trước nằm hoàn toàn trong dải liều làm việc của hệ đo liều (xem 7.7.2).

4.4 Hệ đo liều polymethylmetacrylat yêu cầu việc hiệu chuẩn được liên kết chuẩn đo lường quốc gia hoặc quốc tế. Xem ISO/ASTM Guide 51261.

4.5 Trong quá trình hiệu chuẩn và sử dụng, cần tính đến các hiệu ứng có thể gây bởi các điều kiện như nhiệt độ, ánh sáng, phổ năng lượng và suất liều hấp thụ.

4.6 Vật liệu của liều kế PMMA không được bảo vệ rất nhạy với những thay đổi của độ ẩm, do vậy trong quá trình sản xuất, các miếng nhỏ liều kế phải được bảo quản riêng biệt trong các túi dán kín chống thấm nước. Trong quá trình chiếu xạ, các vật liệu này phải được giữ trong các túi bảo quản kín.

4.7 Liều hấp thụ trong các vật liệu không phải là nước có thể được xác định bằng cách áp dụng các hệ số chuyển đổi theo ISO/ASTM Guide 51261.

CHÚ THÍCH 1 Chi tiết hơn về các phương pháp đo liều khác nhau được áp dụng cho các kiểu bức xạ và các mức năng lượng đề cập trong tiêu chuẩn này, xem các báo cáo của ICRU số 14, 17, 34 và 35.

5 Yêu cầu về thiết bị, dụng cụ

5.1 Thành phần của hệ đo liều PMMA

Các thiết bị, dụng cụ sau đây được sử dụng để xác định liều hấp thụ đối với các hệ đo liều PMMA:

5.1.1 Liều kế polymethylmetacrylat

5.1.2 Máy đo quang phổ (hoặc một thiết bị tương tự), có thể xác định độ hấp thụ quang tại bước sóng phân tích và có văn bản quy định dải bước sóng phân tích, độ chính xác trong chọn bước sóng và xác định độ hấp thụ, độ rộng của phổ và cách loại bỏ ánh sáng vãng lai.

5.1.3 Giá đỡ liều kế, dùng để định vị tái lập liều kế vuông góc với chùm sáng phân tích.

5.1.4 Bộ lọc hấp thụ quang chuẩn đã được hiệu chuẩn, bao trùm toàn bộ dải ngoài dải hấp thụ cần xác định.

5.1.5 Thước đo độ dày đã được hiệu chuẩn.

5.1.6 Hệ thước đo độ dày đã được hiệu chuẩn, có thể đo được toàn bộ dải độ dày cần xác định.

CHÚ THÍCH 2 Đối với các liều kế có độ dày bằng nhau (xem 3.1.15.1) thì nhà sản xuất sẽ ghi riêng các độ dày này và độ đồng đều này trước tiên phải được kiểm định bởi người sử dụng đối với một mẫu đại diện và sau đó người sử dụng có thể thay thế cho phép đo trực tiếp.

5.1.7 Đường chuẩn hoặc hàm đặc trưng độ nhạy của mẻ liều kế (xem 7.7.6).

6 Kiểm tra hiệu năng của các trang thiết bị

6.1 Kiểm tra và lưu hồ sơ về thang đo bước sóng và thang đo độ hấp thụ của máy đo quang phổ tại (hoặc gần) bước sóng phân tích theo kế hoạch định kỳ trước khi sử dụng hoặc khi có dấu hiệu bị hỏng. So sánh và ghi lại các thông tin về đặc điểm kỹ thuật của thiết bị để kiểm định sự làm việc tốt của thiết bị (xem ASTM Practice E 275 và ASTM Practice E 1026).

6.2 Kiểm tra thước đo độ dày trước và sau khi sử dụng, nếu cần, để đảm bảo độ tái lập và tránh hiện tượng trôi điểm "0". Kiểm tra và lưu hồ sơ việc hiệu chuẩn thước đo theo kế hoạch định kỳ. Sử dụng các hệ thước đo có thể liên kết chuẩn đo lường quốc gia hoặc quốc tế đối với mục đích này.

7 Hiệu chuẩn hệ đo liều

7.1 Trước khi sử dụng, hệ đo liều (bao gồm các mẻ liều kế cụ thể và các dụng cụ đo chuyên dụng) cần phải được hiệu chuẩn qui trình hướng dẫn sử dụng trong đó qui định chi tiết quá trình hiệu chuẩn và yêu cầu đảm bảo chất lượng. Quy trình hiệu chuẩn này phải được định kỳ lặp lại để đảm bảo duy trì độ chính xác của phép đo liều hấp thụ trong giới hạn quy định. Các phương pháp hiệu chuẩn được nêu trong ASTM/ISO Guide 51261.

7.2 Chiếu xạ hiệu chuẩn liều kế

Chiếu xạ là một khâu quan trọng của quá trình hiệu chuẩn hệ đo liều. Chiếu xạ hiệu chuẩn bằng cách chiếu xạ liều kế phải được thực hiện theo một trong ba cách sau:

7.2.1 Chiếu xạ liều kế tại một phòng hiệu chuẩn được công nhận, cung cấp liều hấp thụ (hoặc suất liều hấp thụ) có liên kết chuẩn đo lường quốc gia hoặc quốc tế được công nhận;

7.2.2 Chiếu xạ liều kế tại một thiết bị hiệu chuẩn nội bộ cung cấp liều hấp thụ (hoặc suất liều hấp thụ) có liên kết chuẩn đo lường với các chuẩn quốc gia hoặc chuẩn quốc tế được thừa nhận;

7.2.3 Chiếu xạ liều kế tại một thiết bị chiếu xạ sản xuất hoặc nghiên cứu cùng với các liều kế đối chứng hoặc liều kế truyền chuẩn và có liên kết chuẩn đo lường với các chuẩn quốc gia hoặc chuẩn quốc tế được thừa nhận.

7.3 Hiệu chuẩn và xác nhận hiệu năng của dụng cụ đo

Việc hiệu chuẩn và việc xác nhận hiệu năng của các dụng cụ đo giữa các lần hiệu chuẩn xem ISO/ASTM Guide 51261 và/hoặc sổ tay hướng dẫn thực hiện thiết bị cụ thể.

7.4 Thiết bị chiếu xạ gamma hoặc chùm điện tử được sử dụng có thể là thiết bị hiệu chuẩn được công nhận, thiết bị này có thể cung cấp một suất liều hấp thụ được đo bằng liều kế chuẩn chính hoặc liều kế truyền chuẩn, hoặc có thể sử dụng một thiết bị chiếu xạ sản xuất để hiệu chuẩn. Nếu sử dụng thiết bị chiếu xạ sản xuất, thì liều hấp thụ trong các liều kế hiệu chuẩn cần được xác định bằng cách chiếu xạ đồng thời liều kế hiệu chuẩn với các liều kế chuẩn chính hoặc liều kế truyền chuẩn trong cùng điều kiện, đảm bảo rằng liều kế hiệu chuẩn và liều kế chuẩn chính hoặc liều kế truyền chuẩn đều nhận được cùng một giá trị liều, trong cùng một môi trường.

7.4.1 Độ nhạy bức xạ của các liều kế PMMA có thể bị ảnh hưởng bởi các điều kiện khắc nghiệt của môi trường hoặc của các mùa vụ, chẳng hạn như suất liều hấp thụ và nhiệt độ trong một số thiết bị chiếu xạ sản xuất. Trong những trường hợp cụ thể, việc thực hiện hiệu chuẩn liều kế tại các suất liều xác định và nhiệt độ xác định có thể làm tăng độ không đảm bảo đo đến mức không chấp nhận được. Nếu trước khi thực hiện phép đo, những khuyến cáo của nhà sản xuất, hoặc các tài liệu khoa học chỉ ra

các điều kiện môi trường mà các liều kế phải chịu trong các thiết bị chiếu xạ sản xuất là làm tăng đáng kể các độ không đảm bảo, thì các liều kế PMMA nên được hiệu chuẩn trong môi trường có các điều kiện này. Phương pháp hiệu chuẩn này có thể được thực hiện bằng việc sử dụng một máy chiếu xạ sản xuất, dưới các điều kiện đã được thiết lập, sử dụng các liều kế chuẩn chính hoặc liều kế truyền chuẩn để xác định liều hiệu chuẩn đã đưa ra (xem 7.2.3).

7.5 Liều hấp thụ phải được quy định theo liều hấp thụ trong nước, hoặc trong các vật liệu cụ thể khác thích hợp cho các ứng dụng nhất định.

7.6 Hiệu chuẩn liều kế cần tuân theo các điều kiện sau:

7.6.1 Đảm bảo các liều kế vẫn còn trong thời hạn sử dụng theo công bố của nhà sản xuất.

7.6.2 Chọn một vị trí xác định và có thể tái lập để đặt các liều kế trong quá trình chiếu xạ trong trường bức xạ hiệu chuẩn. Trong trường hợp hiệu chuẩn một suất liều xác định, thì lựa chọn một vị trí trong trường hiệu chuẩn mà ở đó sự sai khác về suất liều hấp thụ nằm trong phần thể tích mà liều kế chiếm chỗ với sai số cho phép $\pm 1\%$, tức là trong khoảng 2% . Đối với việc hiệu chuẩn các suất liều hấp thụ khác trong một máy chiếu xạ sản xuất, thì sử dụng một vị trí trong sản phẩm, hoặc trong sản phẩm tương tự, ở đó sự khác biệt về suất liều hấp thụ được chỉ định trong quá trình chiếu xạ sản xuất đã được chứng minh một giới hạn có thể chấp nhận được, ví dụ $\pm 1\%$, tức là trong khoảng 2% .

7.6.3 Nếu sử dụng một thiết bị hiệu chuẩn, thì suất liều hấp thụ cần được liên kết chuẩn đo lường quốc gia hoặc quốc tế. Nhiệt độ của liều kế trong và sau quá trình chiếu xạ và suất liều hấp thụ xác định được sử dụng cần được đưa về gần nhất có thể với nhiệt độ chiếu xạ trung bình, nhiệt độ/thời gian trung bình sau chiếu xạ và các điều kiện về suất liều hấp thụ trung bình trong thực tế xảy ra đối với thiết bị chiếu xạ sản xuất liên quan.

7.6.4 Với bất cứ điều kiện chiếu xạ nào được áp dụng, các liều kế cần được bọc bởi vật liệu PMMA thích hợp hoặc các vật liệu tương đương để đảm bảo các điều kiện cân bằng điện tử.

CHÚ THÍCH 3 Một ví dụ về chiếu xạ gamma sử dụng nguồn cobalt-60, sử dụng 3 mm PMMA đến 5 mm PMMA (hoặc vật liệu polyme tương đương, như polystyren rắn) để bọc tất cả các mặt của liều kế để đảm bảo các điều kiện cân bằng điện tử. Trong trường hợp hiệu chuẩn ở máy chiếu xạ sản xuất, thì các vật liệu này nên ở dạng khối với độ dày thành tối thiểu là 3 mm và có chứa một hoặc nhiều lỗ hổng để đặt các liều kế nhằm đảm bảo rằng các liều kế PMMA và liều kế chuẩn chính hoặc liều kế truyền chuẩn nhận được cùng một giá trị liều hấp thụ.

7.7 Hiệu chuẩn từng liều kế lưu trữ hoặc từng mẻ liều kế trước khi sử dụng để đo liều thông thường. Nếu liều kế dự trữ mới từ cùng một mẻ được lấy để sử dụng, thì có thể không cần thiết phải hiệu chuẩn lại. Tuy nhiên, trong trường hợp này, phải áp dụng một thủ tục kiểm tra để chứng minh liều kế dự trữ mới đó đã được hiệu chuẩn (xem chú thích 4).

TCVN 7911:2008

CHÚ THÍCH 4 Để kiểm tra rằng việc hiệu chuẩn đang còn hiệu lực, chiếu xạ một bộ liều kế tại các mức liều được chọn nằm trong toàn bộ dải liều làm việc của liều kế. Yêu cầu tối thiểu là chiếu xạ các liều kế tại các giới hạn dưới hoặc giới hạn trên và tại các mức liều nằm giữa dải liều làm việc này. Nếu các giá trị thu được trùng với đường chuẩn thì tiến hành đánh giá hiệu chuẩn (một vài sai lệch nhỏ không có ý nghĩa thống kê).

7.7.1 Sử dụng một nhóm gồm ít nhất bốn liều kế cho mỗi điểm liều hấp thụ (xem hướng dẫn xác định cỡ mẫu trong ISO/ASTM Guide 51261).

7.7.2 Số lượng liều kế PMMA trong nhóm và số nhóm được yêu cầu để xác định đường chuẩn của hệ đo liều phụ thuộc vào dải liều làm việc của liều kế. Sử dụng ít nhất năm bộ liều kế cho một khoảng liều theo thang 10, hoặc ít nhất bốn nhóm cho một khoảng liều làm việc nhỏ hơn thang 10. Ví dụ, một dải liều sử dụng từ 0,2 kGy đến 45 kGy sẽ yêu cầu ít nhất 12 liều kế để hiệu chuẩn. Các giá trị liều này có thể được phân bố theo số học đối với một dải liều ngắn, hoặc phân bố theo hình học đối với một dải liều rộng.

CHÚ THÍCH 5 Để xác định số bộ liều kế tối thiểu được áp dụng theo phân bố toán học, chia giá trị liều cực đại trong dải liều làm việc của liều kế (D_{\max}) cho giá trị liều cực tiểu trong dải liều làm việc của liều kế (D_{\min}), sau đó tính logarit cơ số 10 của tỉ số này:

$$Q = \log (D_{\max} / D_{\min}) \quad (3)$$

Nếu Q nhỏ hơn 1, thì sử dụng tối thiểu bốn mức liều. Nếu Q lớn hơn 1, thì lấy $5 \times Q$ và làm tròn giá trị này đến số nguyên gần nhất. Giá trị này đại diện cho số bộ liều kế tối đa cần sử dụng để hiệu chuẩn hệ đo liều.

7.7.3 Xác định độ hấp thụ riêng của các liều kế (xem điều 8).

7.7.4 Tính và ghi lại độ hấp thụ riêng trung bình, \bar{k} và độ lệch chuẩn của mẫu (S_{n-1}) đối với từng nhóm bốn liều kế (hoặc nhiều hơn) cho mỗi giá trị liều hiệu chuẩn.

CHÚ THÍCH 6 Độ lệch chuẩn của mẫu, S_{n-1} , được tính từ tập hợp dữ liệu mẫu của n giá trị như sau:

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum (k_j - \bar{k})^2}{n-1}} \quad (4)$$

trong đó

k_i là giá trị của k thứ i .

7.7.5 Đối với những phép hiệu chuẩn thực hiện tại một máy chiếu xạ sản xuất, thì cần lưu hồ sơ về loại, nhà cung cấp, số mẻ, ngày sản xuất và tất cả các thông tin có liên quan đối với các liều kế chuẩn chính hoặc liều kế truyền chuẩn được sử dụng. Lưu hồ sơ mã số và chi tiết các phép đo thực nghiệm sử dụng, các hệ số hiệu chỉnh (nếu có) và liều chuẩn chính hoặc truyền chuẩn được đo theo độ hấp thụ riêng của liều kế PMMA tương ứng.

7.7.6 Vẽ đồ thị độ hấp thụ theo liều hấp thụ, hoặc sử dụng một mã máy tính thích hợp, hoặc cả hai, để biểu diễn mối quan hệ này theo dạng toán học. Chọn một hàm phân tích (ví dụ, hàm tuyến tính, hàm đa thức hoặc hàm mũ) thích hợp nhất với các dữ liệu đo được. Xem ISO/ASTM Guide 51261.

7.7.7 Kiểm tra đường chuẩn hoặc hàm đặc trưng độ nhạy thu được đối với việc chọn dạng hàm phân tích (Xem ISO/ASTM Guide 51707).

7.7.8 Lập lại quy trình hiệu chuẩn này nếu bất kỳ giá trị nào (hoặc nhiều giá trị) lệch đáng kể khỏi đường cong được xác định và nếu loại bỏ giá trị này thì số liệu sẽ không xác định được đường cong thích hợp (Xem ISO/ASTM Guide 51707 và ISO/ASTM Guide 51261).

CHÚ THÍCH Xem ASTM E178 về hướng dẫn để giải quyết vấn đề kể trên.

7.7.9 Lập lại quy trình hiệu chuẩn định kỳ không quá 12 tháng.

8 Cách tiến hành

8.1 Quy trình bảo quản và kiểm tra liều kế

8.1.1 Bảo quản liều kế theo khuyến cáo của nhà sản xuất.

8.1.2 Đối với từng liều kế lưu trữ hay mẻ liều kế, người sử dụng cần kiểm tra một mẫu đại diện, ví dụ kiểm tra chứng chỉ của nhà sản xuất, tính nguyên vẹn của bao gói liều kế, dải độ dày và độ hấp thụ của mẫu đó trước chiếu xạ trong giới hạn qui định.

8.1.3 Ngay trước khi sử dụng, phải kiểm tra các túi đựng liều kế tránh những liều kế bị sai hỏng; ví dụ các mối hàn của bao gói liều kế. Loại bỏ các liều kế có những sai hỏng không chấp nhận được mà có thể làm tăng sai lệch khi đọc kết quả.

8.2 Quy trình chiếu xạ liều kế

8.2.1 Đánh dấu các liều kế được bao gói để có thể nhận biết một cách dễ dàng.

8.2.2 Đối với việc hiệu chuẩn liều kế, áp dụng quy trình thích hợp như mô tả chi tiết trong điều 7.

8.2.3 Đối với việc kiểm soát quá trình chiếu xạ công nghiệp, đặt các liều kế đã được bao gói tại các vị trí thích hợp [xem TCVN 7248:2008 (ISO/ASTM 51204:2004)].

CHÚ THÍCH 8 Để diễn giải liều hấp thụ, các liều kế có thể được chiếu xạ cùng các sản phẩm được xử lý bằng bức xạ, trong môi trường có các thành phần tương tự hoặc cùng các sản phẩm tương tự. Trong mỗi trường hợp, môi trường phải có các kích thước phù hợp sao cho gần đạt được các điều kiện cân bằng điện tử. Tuy nhiên, các điều kiện cân bằng điện tử như thế có thể không đạt được khi đặt các liều kế cùng với sản phẩm trong các điều kiện chiếu xạ thực tế. Đặc biệt gần với mặt phân cách của các vật liệu khác nhau. Việc chiếu xạ dưới các điều

TCVN 7911:2008

kiện không cân bằng điện tử, chẳng hạn trên bề mặt của thùng sản phẩm thường được áp dụng để kiểm soát liều hấp thụ được chỉ định đối với sản phẩm đó và nó có thể có quan hệ với liều hấp thụ bên trong thùng sản phẩm bởi các hệ số hiệu chỉnh dưới các điều kiện xác định. Chi tiết hơn về vấn đề này, xem ISO/ASTM Guide 51261 và TCVN 7248:2008 (ISO/ASTM 51204:2004).

8.3 Quy trình phân tích sau chiếu xạ

8.3.1 Giữ các miếng PMMA trong các bao bì được hàn kín cho đến khi đọc kết quả.

8.3.2 Kiểm tra những hư hỏng của mỗi bao gói liều kế, ví dụ bao gói liều kế bị rách. Ghi chép lại những hư hỏng của liều kế.

8.3.3 Mở bao gói cẩn thận và nhẹ nhàng lấy mảnh PMMA ra.

8.3.4 Kiểm tra những sai hỏng của mỗi liều kế PMMA, như các vết xước. Ghi chép lại những sai hỏng của liều kế.

8.3.5 Trước khi phân tích cần làm sạch các liều kế PMMA, nếu cần. Có thể dùng các khăn giấy ướt cùng với các dung môi thích hợp như etanol hoặc propanol.

8.3.6 Đặt liều kế PMMA vào giá đỡ dụng cụ đo sao cho nó đứng thẳng và vuông góc với chùm ánh sáng phân tích.

8.3.7 Xác định độ hấp thụ tại bước sóng phân tích đã chọn (xem bảng A.1).

8.3.8 Đo độ dày của liều kế PMMA tại vùng mà chùm ánh sáng phân tích đi qua (xem 3.1.15).

8.3.9 Tính độ hấp thụ riêng (xem 3.1.15).

9 Đặc tính của mỗi mẻ liều kế

9.1 Độ tái lập của độ hấp thụ riêng

9.1.1 Xác định độ tái lập của độ hấp thụ riêng đối với mỗi mẻ liều kế bằng việc phân tích bộ liều kế được chiếu xạ trong quá trình hiệu chuẩn tại mỗi giá trị liều hấp thụ (xem 7.7.2).

9.1.2 Sử dụng độ lệch chuẩn của mẫu, S_{n-1} được xác định trong quá trình hiệu chuẩn (xem 7.7.4) để tính hệ số dao động (CV) đối với mỗi giá trị liều hấp thụ như sau:

$$CV = \frac{S_{n-1}}{k} \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

9.1.3 Ghi chép lại các hệ số dao động và lưu ý những thay đổi bất thường.

CHÚ THÍCH Nhìn chung, nếu giá trị của hệ số dao động lớn hơn 2 % thì nên xác định CV với cỡ mẫu lớn hơn hoặc thay thế liều kế dự trữ. Việc đánh giá dữ liệu, bao gồm cả đánh giá CV được đưa ra trong ISO/ASSTM 51707.

9.2 Các đặc tính sau chiếu xạ

9.2.1 Dưới các điều kiện xác định, các loại liều kế có thể không tạo màu hoàn toàn ngay sau khi chiếu xạ, hoặc màu được tạo ra có thể thay đổi theo thời gian và những thay đổi này tăng cùng với quá trình tăng nhiệt độ. Để xác định các hiệu ứng này đối với ứng dụng tương ứng, cần áp dụng các thủ tục sau: phải biết được đặc tính sau chiếu xạ của mỗi mẻ liều kế bằng việc xác định các độ hấp thụ riêng tại bước sóng phân tích tại các khoảng thời gian khác nhau sau chiếu xạ ở nhiệt độ đó. Chọn lần đo bao gồm lần đo sau chiếu xạ dưới các điều kiện vận hành thông thường. Bảo quản các liều kế trong các bao bì được hàn kín cho đến khi thực hiện phép đo; điều này có nghĩa là mở từng liều kế một và đọc kết quả, tuyệt đối không đọc lại liều kế đã được mở và được đọc kết quả trước đó.

9.2.2 Ghi chép lại bất kỳ thay đổi nào của liều kế sau chiếu xạ.

9.2.3 Nếu độ hấp thụ được đo trong 9.2.1 sau khoảng thời gian dài bảo quản sau chiếu xạ có khác nhau, thì phải áp dụng các yếu tố hiệu chỉnh đối với sự biến động phụ thuộc vào thời gian.

9.2.4 Đối với việc đặt các điều kiện chiếu xạ đã chỉ ra, thì quy trình này yêu cầu cần được thực hiện một lần đối với bộ liều kế đã đề cập.

9.3 Các yếu tố khác

9.3.1 Trong quá trình xác định đặc tính, hiệu chuẩn và sử dụng hệ liều kế, cần phải tính đến các ảnh hưởng (nếu có) của nhiệt độ, độ ẩm, suất liều hấp thụ, phổ năng lượng của bức xạ và bức xạ tử ngoại lên độ nhạy của liều kế.

CHÚ THÍCH 10 Các thông tin liên quan đến mức độ ảnh hưởng lên các phép đo liều có thể tìm thấy trong các nguồn tài liệu khoa học (tài liệu tham khảo **1-25**)⁵⁾, từ các nhà sản xuất liều kế, các nhà phân phối và từ các tổ chức thử nghiệm chất lượng.

10 Ứng dụng của hệ đo liều

10.1 Xác định số lượng liều kế yêu cầu sử dụng cho một phép đo liều hấp thụ dựa trên độ không đảm bảo đo liều chấp nhận được cho ứng dụng đã chỉ ra. Độ chính xác tổng cộng có thể được cải thiện bằng việc lặp lại các phép đo. Xem hướng dẫn về việc xác định số lượng liều kế được yêu cầu trong ASTM Practice E 668.

10.2 Các quy trình tiếp theo thực hiện theo 8.2 đến 8.3.9.

10.3 Đánh giá liều hấp thụ từ các giá trị \bar{k} và từ đường chuẩn hoặc hàm đặc trưng độ nhạy của hệ đo liều.

11 Yêu cầu về hồ sơ tài liệu

11.1 Lưu hồ sơ nhận diện về nhà sản xuất, loại và mẻ liều kế.

⁵⁾ Số in đậm trong dấu ngoặc đơn viện dẫn trong Tài liệu viện dẫn ở cuối Tiêu chuẩn này.

TCVN 7911:2008

11.2 Lưu hồ sơ hoặc viện dẫn ngày hiệu chuẩn, nguồn hiệu chuẩn và các dụng cụ có liên quan được sử dụng để hiệu chuẩn hệ đo lường.

11.3 Lưu hồ sơ các điều kiện bất thường của môi trường trong quá trình chiếu xạ, ví dụ những bất thường của nhiệt độ.

11.4 Lưu hồ sơ tất cả các chi tiết có liên quan, chẳng hạn như ngày chiếu xạ, độ hấp thụ, dữ liệu về độ hấp thụ và độ dày của liều kế, nhận dạng liều kế chuẩn và vị trí chiếu xạ, những ngày phân tích liều kế được chiếu xạ, các thiết bị được sử dụng, giá trị liều hấp thụ xác định được và các thành phần không đảm bảo của chúng.

11.5 Lưu các kết quả theo đúng các yêu cầu của đơn vị như kế hoạch lưu trữ các hồ sơ.

12 Độ không đảm bảo đo

12.1 Phép đo lường cần phải kèm theo độ không đảm bảo đo mới có giá trị.

12.2 Thành phần độ không đảm bảo sẽ được phân thành hai loại sau đây:

12.2.1 Loại A - Được đánh giá bằng phương pháp thống kê, hoặc

12.2.2 Loại B - Được đánh giá bằng phương pháp khác.

12.3 Các cách khác về phân loại độ không đảm bảo đã được dùng rộng rãi và có thể có ích cho báo cáo về độ không đảm bảo. Ví dụ, thuật ngữ độ chụm và độ chệch hoặc sai số ngẫu nhiên và sai số hệ thống (không ngẫu nhiên) được dùng để mô tả các loại sai số khác nhau.

12.4 Nếu thực hiện đánh giá độ không đảm bảo đo theo tiêu chuẩn này, việc đánh giá độ không đảm bảo mở rộng của liều hấp thụ được xác định bởi hệ đo lường này phải nhỏ hơn 6 % với hệ số phủ $k = 2$ (tương ứng với độ tin cậy khoảng 95 % đối với phân bố chuẩn).

CHÚ THÍCH 11 Nhận biết độ không đảm bảo loại A và loại B dựa trên phương pháp đánh giá độ không đảm bảo xuất bản năm 1993 bởi tổ chức tiêu chuẩn quốc tế (ISO) trong tài liệu hướng dẫn về biểu thức độ không đảm bảo trong phép đo (23). Mục đích dùng loại đặc trưng này là để tăng cường sự hiểu biết về độ không đảm bảo được xây dựng như thế nào và cung cấp cơ sở để so sánh quốc tế về kết quả đo.

CHÚ THÍCH 12 ISO/ASTM Guide 51707 xác định các khả năng về độ không đảm bảo đo trong phép đo thực hiện trong thiết bị xử lý chiếu xạ và đưa ra quy trình đánh giá độ không đảm bảo đo của phép đo liều hấp thụ sử dụng hệ đo lường. Tài liệu này đưa ra và bàn luận các khái niệm cơ bản về phép đo, bao gồm đánh giá giá trị định lượng, giá trị "đúng", sai số và độ không đảm bảo đo. Thành phần của độ không đảm bảo đo được xem xét và đưa ra phương pháp đánh giá chúng. Tài liệu này cũng đưa ra các phương pháp tính độ không đảm bảo đo chuẩn kết hợp và độ không đảm bảo đo mở rộng (tổng thể).

Phụ lục A

(tham khảo)

A.1 Thông tin về các liều kế polymethylmetacrylat (PMMA)

A.1.1 Thông tin này chỉ mang mục đích như là một hướng dẫn khi các nguồn liều kế có sẵn và phương pháp sử dụng chúng có thể có thay đổi.

A.1.2 Danh sách chung các liều kế polymethylmetacrylat có sẵn được nêu trong Bảng A.1.1.

A.1.3 Chú ý các dải liều hấp thụ là các dải liều được khuyến cáo. Trong một số trường hợp nó có thể nằm ngoài giới hạn liều trên hoặc giới hạn liều dưới và có thể làm mất đi độ chính xác của phép đo liều.

A.1.4 Danh sách một số nhà cung cấp liều kế được nêu trong Bảng A.2.

A.1.5 Độ nhạy bức xạ của một số loại liều kế PMMA được biết phụ thuộc vào hàm lượng nước, vì vậy các liều kế này được cung cấp ở dạng trong các bao gói được hàn kín và tránh được ánh sáng. Các bao gói này bảo vệ các liều kế, đảm bảo ổn định hàm lượng nước và tránh các liều kế bị chiếu ánh sáng trước khi thực hiện phép đo độ hấp thụ.

Bảng A.1 – Các đặc tính cơ bản của các liều kế polymethylmetacrylat sẵn có

Loại liều kế	Độ dày danh nghĩa mm	Bước sóng phân tích nm	Dải liều hấp thụ kGy
Red 4034	3	640	5 đến 50
Amber 3042	3	603,651	1 đến 30
Radix RN15	1,5	315	5 đến 50
Gammachrome- YR	1,5	530	0,1 đến 3
Gammex	3	650	5 đến 50

Bảng A.2 – Một số nhà cung cấp các liều kế polymethylmetacrylat (PMMA)

Loại liều kế	Địa chỉ
Red 4034	Công ty TNHH Harwell Dosimeters, 540 Becquerel Ave., Harwell
Amber 3042	DIDCOT Oxfordshire, OX11 ORA, Anh
Radix RN15	Công ty TNHH công nghệ bức xạ Co., 168 Ooyegi Takasaki, Gunma 370, Nhật
Gammex	Stralskyddstjänst AB, S-37200 Ronneby, Thụy Điển

A.6 Thông tin về các hiệu ứng của môi trường và các hiệu ứng sau chiếu xạ và sự ảnh hưởng của chúng lên độ chính xác của phép đo liều có thể có được từ các nhà cung cấp liều kế.

Thư mục tài liệu tham khảo

- [1] Chu, R. D. H., and Antoniadis, M. T., "Use of Ceric Sulphate and Persetex Dosimeters for Calibration of Irradiation Facilities." IAEA Report SM192/14. International Atomic Energy Agency Publication. Vienna. 1975.
- [2] Miller, A., Bjergbakke. E., and McLaughlin, W. L., "Some Limitations in the Use of Plastic and Dyed Plastic Dosimeters." *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. Vol 26. 1975. pp. 611-620.
- [3] Olejnik, T. A., "Red 4034 'Perspex' Dosimeters in Industrial Radiation Sterilization Process Control." *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 14. 1979. pp.431-447
- [4] Barrett, J. H., "Dosimetry with Dyed and Undyed Acrylic Plastic." *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, Vol 33. 1982. pp. 1177-1187.
- [5] Whittaker, B. Walls. M. F., Mellor, S., and Heneghan. M., "Some Parameters Affecting the Radiation Response and Post-Irradiation Stability of Red 4034 'Perspex' Dosimeters." *Proceedings of the International Symposium. "High-Dose Dosimetry,"* IAEA Publication STI/PUB/671. Vienna. 1984.
- [6] Levine, H., McLaughlin, W. L., and Miller, A., "Temperature and Humidity Effects on the Gamma-Ray Response and Stability of Plastics and Dyed-Plastic Dosimeters." *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 14. 1979, pp. 551-574.
- [7] Al-Sheikhly, M., Chappas, W. J., McLaughlin, W. L., and Humphreys. J. C., "Effects of absorbed Dose-rate, Irradiation Temperature, and Post Irradiation Temperature on the Gamma Ray Response of Red Perspex Dosimeters." *Proceedings of an International Symposium. "High Dose Dosimetry for Radiation Processing."* IAEA Publication STI/PUB/ 846. International Atomic Energy Agency. Vienna. 1991.
- [8] McLaughlin, W. L., Boyd, A. W., Chadwick, K. H., McDonald, J. C and Miller, A., "Dosimetry for Radiation Processing." (Textbook). Taylor and Francis (publishers). London. New York. Philadelphia. 1989.
- [9] Glover, K. M., Plesicd, M. E., Watts, M. F., and Whittaker, B., "A Study of Some Parameters Relevant to the Response of Harwell PMMA Dosimeters to Gamma and Electron Irradiation." *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 42. 1993. pp. 739-742.
- [10] Sohrabpour, M., Kazemi, A. A., Mousavi, H., and Solati, K. "Temperature Response of a Number of Plastic Dosimeters for Radiation Processings" *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 41 1993. pp. 783-787
- [11] Miller, A., and Chadwick, K. H., "Dosimetry for the Approval of Food Irradiation Processes." *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 34. 1989. pp. 999-1004
- [12] "Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams." IAEA, *Technical Report Series*. No. 277. Vienna. 1987.

- [13] Whittaker, B., "Uncertainties in Absorbed Dose as Measured Using PMMA Dosimeters." *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 42.1993, pp. 841-844.
- [14] Whittaker, R. "Recent Developments in Poly(Methyl Methacrylate)/ Dye Systems for Dosimetry Purposes." *Proceedings of the International Symposium. "Radiation Dose and Dose Distribution Measurements in the Megarad Range."* National Physical Laboratory, United Kingdom. 1970.
- [15] Barrett, J. H., Glover. K. M, McLaughlin, W. L. Shaibe, P. H. G., Watts, M. F., and Whittaker. B., "A High-Dose Intercomparison Study Involving Red 4034 'Perspex' and Radiochromic Dye Film," UKAEA. *Harwell Report AERE-R13159*. 1988. *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 36. 1990. pp. 505-507.
- [16] Kojima, T., Haneda, N., Miiomo. S., Tachihana, H., and Tanaka, R., "The Gamma-Ray Response of Clear Polymethylmethacrylate Dosimeter. Radix RN15." *Journal of Applied Radiation and Isotopes*. Vol 43. No 10. 1992. p. 1197.
- [17] Chadwick, K. H., "The Effect of Light Exposure on the Optical Density of Irradiated Clear Polymethylmethacrylate." *Physics in Medicine and Biology*, Vol 17. 1972. pp. 88-93.
- [18] Chadwick, K. H., "The Effect of Humidity on the Response of HX 'Perspex' Dosimeters." IAEA Report TECDOX-321, 1984.
- [19] Whittaker, B., "A New PMMA Dosimeter for Low Doses and Low Temperatures." *Radiation Physics and Chemistry*, Vol 35. 1990. pp. 699-702.
- [20] Miller, A., "Dosimetry for Radiation Processing." *Proceedings of an International Symposium on Radiation Chemistry and Processing*. Czechoslovakia. *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 28. 1986. pp. 521-529.
- [21] Chadwick, K. H., "Radiation Measurements and Quality Control." *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 14. 1979. pp. 203-212.
- [22] Ellis, S. C., Barrett, J. H., and Morris. W. T., "Radiation Standards and Dosimetry for Radiation Processing." *Proceedings of the International Conference. "Radiation Processing for Plastics and Rubber."* Cambridge. UK. 1984.
- [23] "Guide to Expression of Uncertainty, in Measurement" International Organization for Standardization. 1993. ISBN 92-67-10188-9. Available from ISO Central Secretariat. Post Box 56. CH-1211 Geneva. Switzerland.
- [24] Biramontn, S., Haneda. N., Tachibana. H. and Kojima. T., "Effect of Low Irradiation Temperature on the Gamma-Ray Response of Dyed and Un-dyed PMMA Dosimetes," *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 48. No. 1. 1996, pp. 105-109.
- [25] Whittaker, B., Wats M. F., "The Influence of Dose Rate. Ambient Temperature and Time on the Radiation Response of Pmma Dosimeters" *Radiation Physics and Chemistry*. Vol 60. 2001. pp. 101 -110.
-