

Kvantifikacija pojačivačkog efekta olovnih folija kod industrijske računalne radiografije

Geršić, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:310263>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Geršić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Student:

Tomislav Geršić

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru, prof. dr. sc. Damiru Markučiću, što je u meni pobudio interes za područje kontrole bez razaranja te me usmjerio u polje računalne radiografije. Zahvaljujem se i kolegi Marku Rakvinu bez čije pomoći, bezbrojnih savjeta i strpljenja ovaj rad ne bi bilo moguće napraviti. Zahvalu dugujem i laborantu Tomislavu Kezele koji je osigurao kvalitetno provođenje eksperimentalnog dijela ovoga rada.

Tomislav Geršić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Geršić** Mat. br.: 0035167027

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kvantifikacija pojačivačkog efekta olovnih folija kod industrijske računalne radiografije**
Naslov rada na engleskom jeziku: **Quantification of intensifying lead screens effect in industrial computed radiography**
Opis zadatka:

Olovne folije standardno se koriste kod klasične industrijske radiografije na film prilikom ekspoziranja ispitivanog objekta energijama u rasponu od 80-400 kV zbog pojačivačkog efekta i smanjenja neželjenog sekundarnog zračenja, što u konačnici rezultira poboljšanjem kvalitete radiografskog zapisa. Kod računalne radiografije (eng. Computed Radiography - CR) senzor zračenja je slikovna ploča (eng. Imaging Plate - IP). Specifična struktura i kemijski sastav fotoosjetljivog sloja slikovnih ploča rezultira promjenom utjecaja olovnih folija na kvalitetu digitalnog radiografskog zapisa u odnosu na klasičnu industrijsku radiografiju na film. U cilju optimiranja sustava slikovna ploča-olovna folija pri ekspoziranju različitim energijama zračenja u radu je potrebno:

- opisati fizikalne mehanizme djelovanja olovnih folija na senzore ionizirajućih zračenja (radiografski film i slikovna ploča);
- provesti laboratorijska ispitivanja pomoću sustava za računalnu radiografiju u svrhu određivanja utjecaja olovnih folija na kvalitetu digitalnog radiografskog zapisa variranjem debljine olovnih folija i vrste slikovne ploče pri različitim energijama zračenja;
- na dobivenim radiografskim zapisima kvantificirati utjecaj olovnih folija mjerenjem kvantitativnih pokazatelja kvalitete radiografskog zapisa (intenzitet piksela, odnos signal/šum);
- temeljem analize rezultata predložiti optimalne kombinacije sustava "slikovna ploča-energija zračenja-debljina olovne folije".

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te dobivenu stručnu pomoć.

Zadatak zadan:

25. rujna 2014.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Rok predaje rada:

27. studenog 2014.

Predviđeni datum obrane:

3., 4. i 5. prosinca 2014.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. RADIOGRAFIJA	2
2.1. Fizikalni principi radiografije	3
2.1.1. Karakter i nastanak x- zraka.....	3
2.1.2. Karakter i nastanak gama- zraka	8
2.1.3. Međudjelovanje zračenja i materije kroz koju prolazi	9
2.2. Praktična izvedba radiografskog sustava	15
2.2.1. Izvori x- zraka	16
2.2.2. Izvori gama- zraka	21
2.2.3. Radiografski filteri	24
2.2.4. Filmovi	25
3. POJAČAVAJUĆE FOLIJE	28
4. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA	31
4.1. Dijelovi sustava računalne radiografije.....	33
4.1.1. Slikovne ploče.....	33
4.1.1.1. Kodak Industrex slikovne ploče.....	36
4.1.2. Laserski skener.....	41
5. PRAKTIČNI DIO	42
5.1. Eksperimentalni postav	42
5.2. Analiza radiograma	47
5.2.1. Određivanje prostorne razlučivosti	49
5.2.2. Određivanje utjecaja folije na intenzitet snimke	50
5.2.3. Određivanje odnosa signal- šum	51
5.3. Rezultati mjerenja	51
5.4. Analiza rezultata mjerenja.....	58

5.4.1. Utjecaj folije na intenzitet snimke	58
5.4.2. Odnos signal- šum.....	60
6. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	64
PRILOZI.....	67

POPIS SLIKA

Slika 1.	Ilustrativni prikaz radiografskog procesa [3]	2
Slika 2.	Elektromagnetski spektar [5].....	3
Slika 3.	Pojednostavljeni prikaz rendgenskog uređaja [7].....	4
Slika 4.	Pojednostavljeni prikaz rendgenske cijevi [7].....	4
Slika 5.	Nastanak rendgenskog kvanta kočenjem elektrona u polju jednog atoma [7]	6
Slika 6.	Spektar x- zraka, distribucija intenzitet/ valna duljina [3]	6
Slika 7.	Karakteristično zračenje [8]	7
Slika 8.	Spektralne linije za Se75, Ir192 i Co60 [7]	8
Slika 9.	Fotoelektrični efekt [9]	10
Slika 10.	Comptonov efekt [9].....	10
Slika 11.	Tvorba para elektron- pozitron [9]	11
Slika 12.	Utjecaj efekata međudjelovanja na linearni koeficijent prigušenja za čelik [3]....	12
Slika 13.	Intenzitet homogenog zračenja kao funkcija povećanja debljine materijala [3] ...	13
Slika 14.	Intenzitet heterogenog zračenja kao funkcija povećanja debljine materijala [3] ..	13
Slika 15.	Ilustrativni prikaz debljine poluapsorpcije materijala [3]	14
Slika 16.	Radiografski sustav sa izvorom x- zraka [2]	16
Slika 17.	Rendgenska cijev [3]	16
Slika 18.	Katoda i anoda rendgenske cijevi [4]	17
Slika 19.	Efektivna veličina žarišta [3].....	18
Slika 20.	Energetski spektar uz promjenjivi napon cijevi i konstantnu struju cijevi (ovdje 10 mA) [3]	18
Slika 21.	Energetski spektar uz promjenjivu struju cijevi i konstantan napon cijevi (ovdje 200 kV) [3]	19
Slika 22.	Panoramska rendgenska cijev sa šupljom anodom [3].....	20
Slika 23.	Unipolarna rendgenska cijev [3]	20
Slika 24.	Bipolarna rendgenska cijev [3].....	21

Slika 25.	Izvedba konstrukcije izvora gama- zraka [4]	22
Slika 26.	Kapsula gama- izvora [3]	22
Slika 27.	Izvor zračenja postavljen u rotirajućem cilindru [3]	23
Slika 28.	Moderna izvedba radno- transportnog kontejnera sa S- kanalom [3]	23
Slika 29.	Princip rada kontejnera sa S- kanalom [3]	24
Slika 30.	Utjecaj korištenja filtra na kvalitetu dobivene radiografske snimke [11]	25
Slika 31.	Shematski presjek radiografskog filma [3].....	26
Slika 32.	Denzitometar [15].....	26
Slika 33.	Primjer pakiranja radiografskog filma [14]	27
Slika 34.	Utjecaj kontakta između olovne folije i filma na kvalitetu radiografske snimke [4]	29
Slika 35.	Utjecaj izgrebane olovne folije na rezultirajuću radiografsku snimku [4]	29
Slika 36.	Radiografski snimak odljevka dobiven bez olovne folije i sa njenim korištenjem [3]	29
Slika 37.	Presjek slikovne ploče [3]	34
Slika 38.	Usporedba odnosa zacrnjenja i doze filma i slikovne ploče [3].....	35
Slika 39.	Otvorena CR kazeta sa slikovnom pločom [3].....	36
Slika 40.	Kodak Industrex slikovne ploče [22]	37
Slika 41.	Okvirni odabir slikovne ploče [22].....	37
Slika 42.	Usporedba oštrina Kodak Industrex slikovnih ploča [21]	38
Slika 43.	Sposobnost Kodak Industrex ploča da zadrži izvorni signal prema ASTM E2445 [21]	39
Slika 44.	Apsorpcija zračenja kod Kodak Industrex slikovnih ploča [21]	40
Slika 45.	Emisija svjetlosti Kodak Industrex slikovnih ploča [21]	40
Slika 46.	Osnovni princip rada laserskog uređaja [18].....	41
Slika 47.	Automatizirani CR skener [3]	41
Slika 48.	Korištene folije (tanja folija je lijevo, a deblja desno)	42

Slika 49.	Duplex indikator [24]	44
Slika 50.	Korišteni indikator	44
Slika 51.	Fizički postav pokusa	46
Slika 52.	Skener VMI 5100MS	46
Slika 53.	Slika prije linearizacije i invertiranja	48
Slika 54.	Slika nakon linearizacije i invertiranja	48
Slika 55.	Podešavanje postavki prema naputcima proizvođača	49
Slika 56.	Određivanje prostorne razlučivosti.....	49
Slika 57.	Jedanaesti element Duplex indikatora pokazuje <i>dip</i> manji od 20 %.....	50
Slika 58.	Očitavanje prostorne razlučivosti.....	50
Slika 59.	Ilustrativni prikaz podataka dobivenih korištenjem <i>ROI Stats</i> postavke.....	51
Slika 60.	I_{φ}/I_0 - XL Blue ploča	58
Slika 61.	I_{φ}/I_0 - GP ploča	58
Slika 62.	I_{φ}/I_0 - HR ploča.....	59
Slika 63.	I_{φ}/I_0 - sve ploče	59
Slika 64.	SNR_N - XL Blue ploča	60
Slika 65.	SNR_N - GP ploča	61
Slika 66.	SNR_N - HR ploča.....	61
Slika 67.	SNR_N - sve ploče.....	62

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva pojedinih radioaktivnih materijala korištenih u industrijskoj radiografiji [4]	9
Tablica 2. Prosječne HVT- vrijednosti za olovo [3].....	15
Tablica 3. Usporedba vremena ekspozicije olovne i fluorometalne folije [3]	30
Tablica 4. Nominalna debljina slojeva Kodak Industrex slikovnih ploča [21]	38
Tablica 5. Prostorna razlučivost kod pojedinih elemenata duplex indikatora [24]	43
Tablica 6. Plan izvođenja pokusa	45
Tablica 7. Karakteristike skenera VMI 5100MS [26]	47
Tablica 8. Rezultati mjerenja- XL Blue ploča, I_f/I_0	52
Tablica 9. Rezultati mjerenja- XL Blue ploča, SNR_N	53
Tablica 10. Rezultati mjerenja- GP ploča, I_f/I_0	54
Tablica 11. Rezultati mjerenja- GP ploča, SNR_N	55
Tablica 12. Rezultati mjerenja- HR ploča, I_f/I_0	56
Tablica 13. Rezultati mjerenja- HR ploča, SNR_N	57

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
λ	nm	valna duljina
U	V	električni napon
E	eV	energija elektrona
ν	Hz	frekvencija
c	km/ s	brzina svjetlosti
μ		linearni koeficijent prigušenja
μC		prigušenje uslijed Comptonovog efekta
μF		prigušenje uslijed fotoelektričnog efekta
μP		prigušenje uslijed stvaranja elektron- pozitron para
t	mm	debljina materijala
d	mm	promjer

SAŽETAK

U ovome je radu, kao jedna od metoda nerazornih ispitivanja, obrađena računalna radiografija. Za potrebe teoretske razrade rada, opisani su fizikalni mehanizmi djelovanja olovnih folija na senzore ionizirajućih zračenja. Kako bi se odredio utjecaj olovnih folija na kvalitetu digitalnog radiografskog zapisa, provedena su laboratorijska ispitivanja kod kojih su varirane debljine olovnih folija, vrste slikovnih ploča i energije zračenja. Dobiveni digitalni radiografski zapisi analizirani su *softwareom* StarrPlot. Interpretacijom rezultata donesen je zaključak o isplativosti korištenja olovnih folija kod računalne radiografije.

Ključne riječi: nerazorna ispitivanja, računalna radiografija, olovne folije, kvaliteta digitalnog radiografskog zapisa

SUMMARY

The thesis deals with computed radiography, one of the non- destructive testing methods. The physical mechanisms of the effect lead screens have on the ionizing radiation sensors have been described in the theoretical part of the paper. Experiments were carried out to determine the influence of lead screens on the quality of digital radiographic images. In those experiments, different lead screen thicknesses, image plates and radiation energies were varied. Obtained digital radiographic images were analyzed using the StarrPlot software. The results interpretation provided the conclusion regarding the use of lead screens in computed radiography.

Key words: non- destructive testing, computed radiography, lead screens, quality of digital radiographic image

1. UVOD

Mnoga se znanstvena postignuća mogu povezati sa nerazornim ispitivačkim metodama koje, određujući karakter nutrine ispitivanog predmeta bez razaranja njegove konstrukcije i smanjenja njegove uporabne vrijednosti, osiguravaju zadovoljavajuće ponašanje promatranog objekta.

Radiografija je danas jedna od najvažnijih i najsvestranijih metoda nerazornih ispitivanja. Koristeći penetrirajuće x ili gama- zračenje, ispitivač dobiva povratne informacije o strukturalnoj nutrini predmeta ispitivanja.

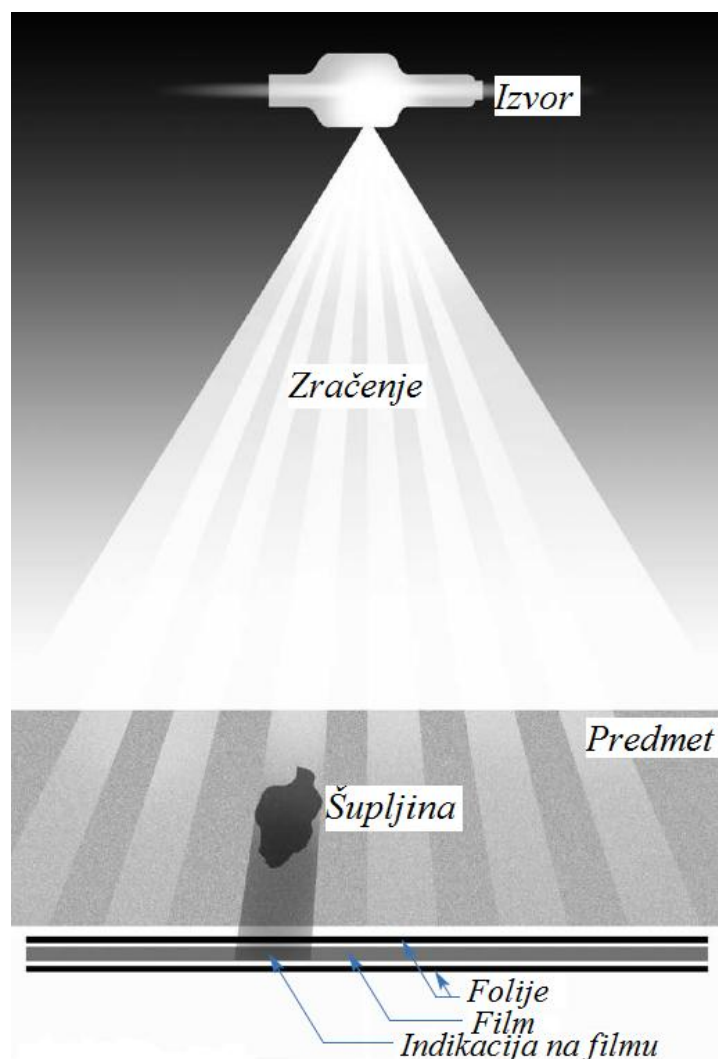
Kako to uobičajeno biva, paralelni razvoj modernih tehnologija, a ponajprije mikroprocesora i računala, utjecao je i na samu radiografiju. Suvremena radiografija, naime, sve više napušta klasični radiografski film i okreće se metodama digitalne radiografije. Jedna od grana digitalnog radiografskog pristupa jest i računalna radiografija, tema ovoga rada. Ona se od ostalih radiografskih procesa razlikuje po korištenju slikovnih ploča sa fosfornim slojem, kod kojih se dobivena latentna slika razvija upotrebom CR skenera.

U ovom je tekstu, radi upoznavanja sa radiografskom metodom, prvo obrađena klasična primijenjena radiografija (njeni fizikalni principi te izvedba odgovarajućeg radiografskog sustava). Nakon toga, prišlo se razradi tematike računalne radiografije, sa specijalnim naglaskom na slikovne ploče, gdje su se dodatno posebno promotrile Kodak Industrex slikovne ploče koje su korištene u praktičnoj realizaciji ovoga rada.

2. RADIOGRAFIJA

Radiografija jest skupni naziv za niz metoda snimanja živih bića i neživih predmeta sa ciljem dobivanja uvida u njihovu nutrinu. U tu se svrhu koriste x i gama- zrake malih valnih duljina koje im omogućuju prolazak kroz vrlo guste materijale te izlazak na drugoj strani [1].

Energija x i gama- zraka uzrokuje stvaranje latentnih slika. Dobiveni kontrast ovisi o količini emitirane energije koja je stigla do filma. Naime, deblji i gušći predmeti apsorbiraju više energije, pa manje energije stigne do samog filma, što rezultira stvaranjem svjetlijih tonova na filmu. S druge strane, tanji ili rjeđi objekti će, usred manje apsorpcije, dopustiti većem udjelu emitirane energije x ili gama- zraka da dođu do filma. To će dovesti do formiranja tamnijih područja na filmu [2]. Ilustracija radiografskog procesa dana je slikom 1.



Slika 1. Ilustrativni prikaz radiografskog procesa [3]

Danas je radiografija jedna od najvažnijih (i najsvestranijih) metoda nerazornih ispitivanja u industriji. Predmeti radiografskih ispitivanja u strojarstvu mogu biti širokog raspona veličina i masa te se, u relativno kratkom roku, može ispitati veliki broj objekata (što naglašava efikasnost samog postupka). Ta je svestranost radiografije rezultirala etabliranjem brojnih samostalnih profesionalnih radiografskih laboratorija, baš kao i formiranjem mnogih radiografskih odjeljenja unutar samih proizvodnih pogona [4].

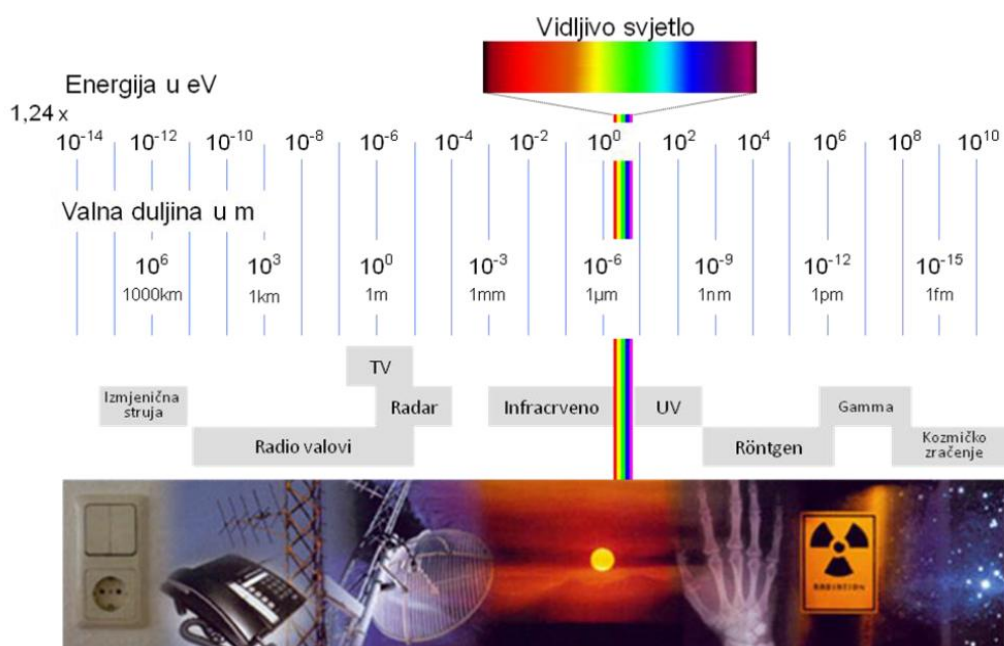
U daljnjem će se tekstu ukratko obraditi fizikalni principi radiografije te značajke praktičnih izvedbi radiografskih sustava.

2.1. Fizikalni principi radiografije

U tekstu koji slijedi definirat će se narav i nastanak x i gama- zraka te će biti dotaknuti pojedini aspekti međudnosa materije i oblika zračenja koji kroz nju prolazi.

2.1.1. Karakter i nastanak x- zraka

X- zrake spadaju u visokoenergetski dio elektromagnetnog spektra, između UV- zračenja i gama- zraka (slika 2). One su, poput svjetla, oblik elektromagnetskog zračenja. Karakterizira ih ekstremno mala valna duljina (tek 1/ 10 000 valne duljine svjetla) zbog čega mogu penetrirati u materijale koji apsorbiraju ili reflektiraju svjetlo. U međudjelovanju s materijom ponašaju se kao čestice (paketići energije) te se ne mogu fokusirati [4], [5], [6].



Slika 2. Elektromagnetski spektar [5]

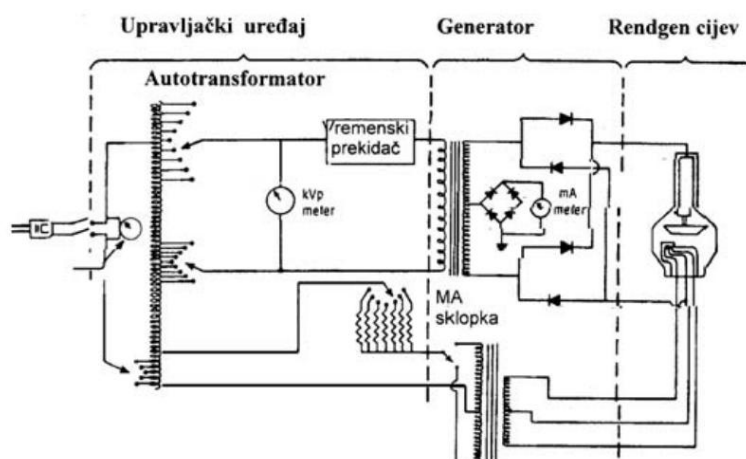
Glavni izvori x- zračenja mogu biti ili radioaktivni materijali (primjerice, Am- 241), ili (najčešće) rendgenska cijev [5].

Rendgenska je cijev zrakoprazna cijev na koju je doveden visoki napon. X- zrake, u osnovi, nastaju naglim zaustavljanjem (kočenjem) elektrona, koji su ubrzani u jakom električnom polju, na meti koja je načinjena od metala.

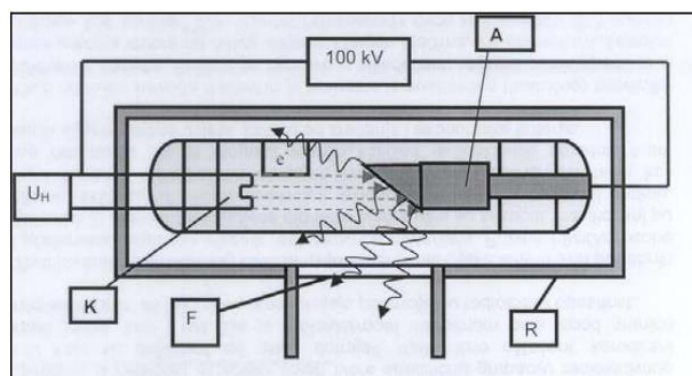
Tipično, svaki se rendgen uređaj sastoji od tri osnovna dijela (kako sugerira slika 3):

- Upravljački uređaj,
- Generator visokog napona,
- Rendgenska cijev [7].

Rendgenska je cijev prikazana slikom 4 (U_H - napon grijanja, K - katoda, A - anoda, R - rendgensko kućište, F - otvor za prolaz zračenja).



Slika 3. Pojednostavljeni prikaz rendgenskog uređaja [7]

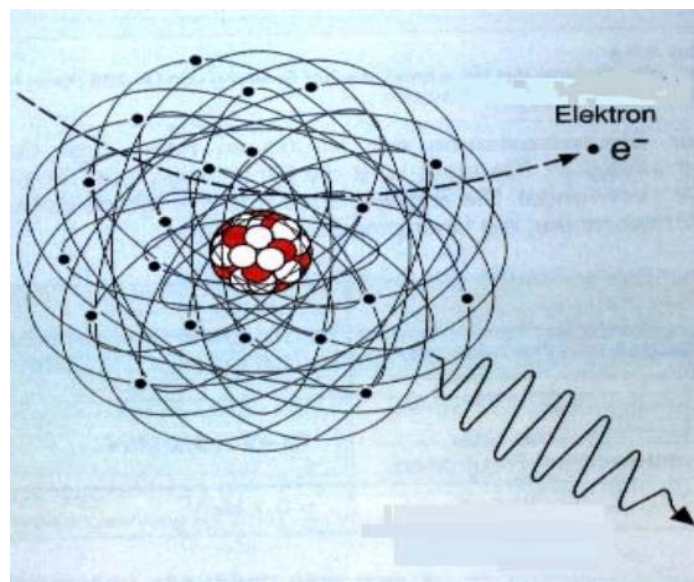


Slika 4. Pojednostavljeni prikaz rendgenske cijevi [7]

Primarna zadaća električnih krugova jest proizvodnja što većeg broja elektrona koji se usmjeravaju na malu površinu u anodi (žarište) i to na način da, u trenutku udara u žarište, elektroni dobivaju visoku količinu (kinetičke) energije zbog ubrzanja u električnom polju koje je uspostavljeno u rendgenskoj cijevi između katode (električki negativno nabijene) i anode (električki pozitivno nabijene). Kako su elektroni negativno nabijeni, anoda ih privlači.

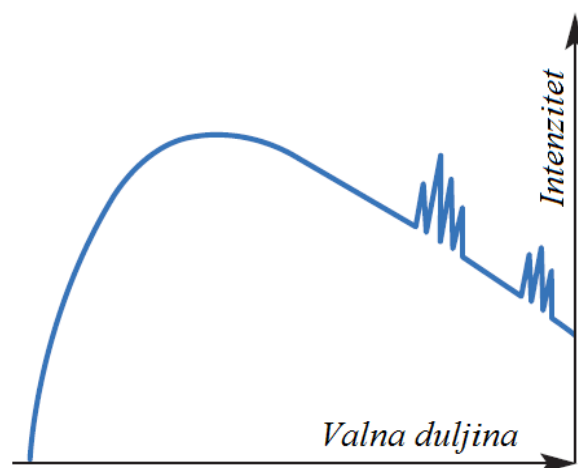
Razlog potrebe za zrakopraznošću rendgenske cijevi leži u zahtjevu da se elektroni ne sudaraju s molekulama zraka prije udara na anodi. Elektroni nastaju emisijom iz žarne niti koja je ugrađena u sekundarnom električnom krugu u katodi. Prolazom struje kroz taj sekundarni krug iz žarne niti isijavaju se elektroni koji potom ulaze u jako električno polje između katode i anode koje nastaje prolazom struje u primarnom strujnom električnom krugu.

Elektroni koji udaraju u žarište na anodi imaju visoku količinu energije u obliku energije gibanja (kinetička energija). Pri udaru u anodu, elektroni stupaju u interakciju s atomima koji tu anodu grade i predaju svoju energiju na tome mjestu. Interakcija se događa na maloj dubini u anodi. Elektroni koji u sudarima predaju svoju energiju se pri interakciji usporavaju ili zaustavljaju te su dalje otpremljeni električnim krugom, doprinoseći struji primarnog kruga. Elektroni integriraju s elektronima u elektronskom omotaču atoma anode ili s jezgrom tih atoma. Kao rezultat tih interakcija, događa se konverzija kinetičke energije u toplinsku energiju (anoda se zagrijava) i u elektromagnetsku energiju (x- zrake). Najveći dio kinetičke energije upadnih elektrona pretvara se u toplinu koja je pohranjena u anodi (oko 99 %), a samo se 1 % kinetičke energije pretvara u x- zračenje. Upadni elektroni koji su u atomu anode izbjegli interakciju s njegovim elektronima mogu doći dovoljno blizu jezgre da osjećaju njezin utjecaj. Kako je elektron negativno nabijen, a jezgra pozitivna, među njima je privlačna sila. Jezgra sadrži mnogo protona, pa je privlačna elektrostatska sila jezgre snažna. Kako se elektron približava jezgri, sve se više usporava, mijenja smjer te odlazi sa smanjenom kinetičkom energijom u drugome smjeru. Taj gubitak kinetičke energije pojavljuje se u obliku fotona x- zračenja (zakon o očuvanju energije). Što je ubrzanje veće (što je veći napon), tim će se proizvoditi više fotona te se tim više stvaraju energijom bogati fotoni („tvrđi“ fotoni, fotoni s kraćom valnom duljinom). Zbog „kočenja“ elektrona u blizini jezgre, ovaj se proces naziva i zakočnim zračenjem (slika 5) [7].



Slika 5. Nastanak rendgenskog kvanta kočenjem elektrona u polju jednog atoma [7]

Upadni elektron kod kočenja može izgubiti bilo koji iznos svoje energije. Samim time, i mnoštvo takvih elektrona koji udaraju u metu i međusobno reagiraju s jezgrom mogu, svaki za sebe, izgubiti različite količine početne energije. Iz toga razloga se kaže da postoji kontinuirani spektar rendgenskog zračenja, odnosno da je zračenje kojeg emitira rendgenska cijev heterogenog karaktera (više x- zraka različitih valnih duljina). Takav spektar primjerno je dan slikom 6 (mali vrhovi predstavljaju karakteristično zračenje materijala mete). Prosječni oblik spektra x- zraka generalno je isti, ali se ipak, zavisno od pojedinih faktora (primjerice, energije elektrona ili struje napajanja), diferencira od spektra drugog x- zračenja [3], [7].



Slika 6. Spektar x- zraka, distribucija intenzitet/ valna duljina [3]

Najmanja valna duljina spektra izražava se Duane- Hunt formulom, kako je dano jednadžbom (1).

$$\lambda_{min} = \frac{1,234}{kV} \quad (1)$$

Ovdje vrijedi:

- λ - valna duljina, *nm*,
- *kV*- napon, *kV*.

Energija jedne valne duljine (energija jednog fotona) dana je izrazima (2) i (3).

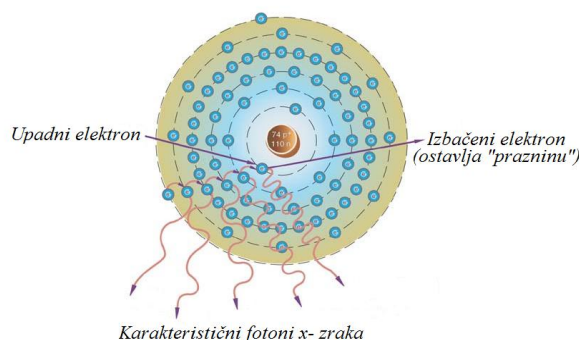
$$E = h \cdot \nu \quad (2)$$

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (3)$$

Ovdje je:

- *E*- energija, *eV*,
- *h*- Planckova konstanta,
- ν - frekvencija, *Hz*,
- *c*- brzina elektromagnetskog zračenja (kao brzina svjetlosti, *300.000 km/ s*) [3].

Osim zakočnim zračenjem, zavisno od materijala anode, nastaje i karakteristično rendgensko zračenje (dano slikom 7). Do njega dolazi kada elektron pri velikoj brzini udari u atom metala i, time, izbaci elektron iz njegove ljuske. Ostali elektroni tada padaju za jednu razinu energije kako bi popunili praznu ljusku, a energija koju time gube pretvara se u fotone zračenja. Zračenje dobiveno ovim načinom intenzivnije je od kočnog zračenja, a dobiveni foton ima samo jednu valnu duljinu [3], [8].

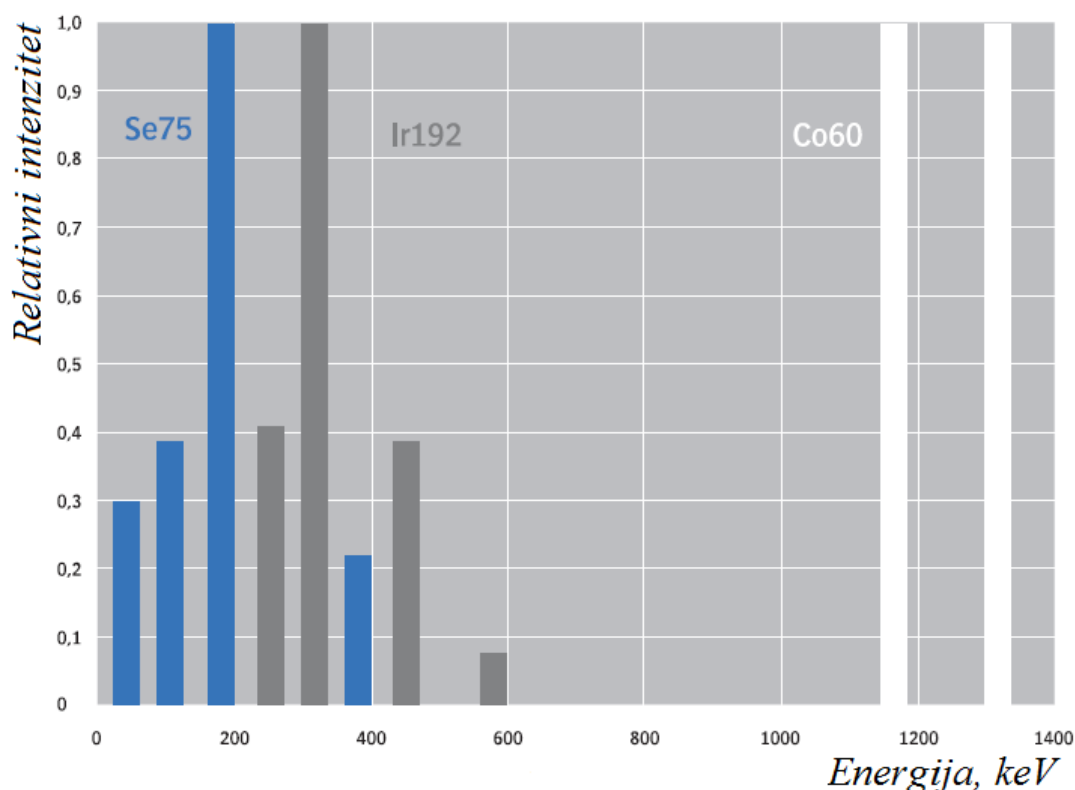


Slika 7. Karakteristično zračenje [8]

2.1.2. Karakter i nastanak gama- zraka

Do nastanka gama- zraka dolazi kod radioaktivnog raspada izotopa pojedinog elementa (u radiografiji se najčešće koriste iridij 192 i kobalt 60 te, u ograničenim količinama, tulij 170, cezij 137 i radij 226) gdje nestabilna jezgra spontano prelazi sa više energetske razine na nižu, pri čemu se emitiraju gama- zrake. Narav nastanka gama- zračenja očito je prirodnijeg karaktera nego ona x- zraka. Samim time, energiju se gama- zraka ne može kontrolirati; ona ovisi o samoj prirodi radioaktivne tvari. Također, nije moguće kontrolirati niti intenzitet gama- zraka (jer se ne može utjecati na radioaktivni raspad tvari) [7], [9].

Gama- zrake su, kao i x- zrake, vid elektromagnetskog zračenja. Ipak, za razliku od x- zraka, gama- zrake ne emitiraju kontinuirani spektar, već jednu ili nekoliko izoliranih diskretnih valnih duljina. Energetski spektar selenija 75, kobalta 60 i iridija 192 dan je slikom 8 [7].



Slika 8. Spektralne linije za Se75, Ir192 i Co60 [7]

Radiografija gama- zrakama ima prednost korištenja jednostavnije izvedbe. Ipak, aktivnost izvora gama- zračenja opada s vremenom, ovisno o vrsti radioaktivnog materijala (prikazano tablicom 1) [4].

Tablica 1. Svojstva pojedinih radioaktivnih materijala korištenih u industrijskoj radiografiji [4]

Radioaktivni element	Vrijeme poluraspada	Energija gama- zraka, MeV
<i>Tulij 170</i>	127 dana	0,084 i 0,54
<i>Iridij 192</i>	70 dana	0,137 do 0,651
<i>Cezij 137</i>	33 godine	0,66
<i>Kobalt 60</i>	5,3 godine	1,17 i 1,33

Kako tablica 1 sugerira, penetracijske su sposobnosti gama- zraka kobalta 60 izvanredne (u određenim bi se okolnostima njima moglo radiografski ispitivati čelik debljine oko 23 cm). Zračenje ostalih radioaktivnih materijala osjetno je manje. Primjerice, iridij 192 emitira zračenje ekvivalentno onome x- zraka nastalih konvencionalnom rendgenskom cijevi uz 600 kV [4].

Pomoću pojma poluraspada može se ekstrapolirati i aktivnost izvora zračenja. Ona je predstavljena brojem raspada u jedinici vremena koji se događa u masi tog uzorka. Jedinica kojom se izražava aktivnost jest 1 becquerel, oznake 1 Bq, kako je prikazano jednadžbom (4) [7].

$$1Bq = \frac{1 \text{ raspad}}{1 \text{ sekunda}} \quad (4)$$

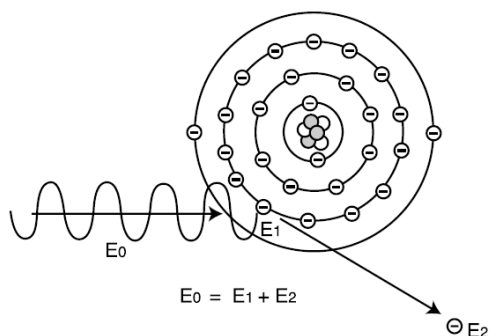
2.1.3. Međudjelovanje zračenja i materije kroz koju prolazi

Ako se na stranu stavi razlika prirode nastanka samog zračenja, x- zrake i gama- zrake vrlo su slične; nisu vidljive te ih ljudska osjetila ne mogu registrirati, propagiraju pravolinijski i to brzinom svjetlosti, ne mogu se fokusirati, mogu prolaziti kroz materiju (pri čemu se djelomično apsorbiraju), ionizirajuće su i mogu uništiti žive stanice [3].

Kako se kod x- zraka i gama- zraka ne radi o čestičnom zračenju (kao kod alfa i beta- čestica koje imaju masu), već o zračenju sastavljenom od fotona (paketi energije), kod interakcije fotona elektromagnetskog zračenja i materije ne dolazi do klasičnih sudara, već do tri osnovna mehanizma interakcije:

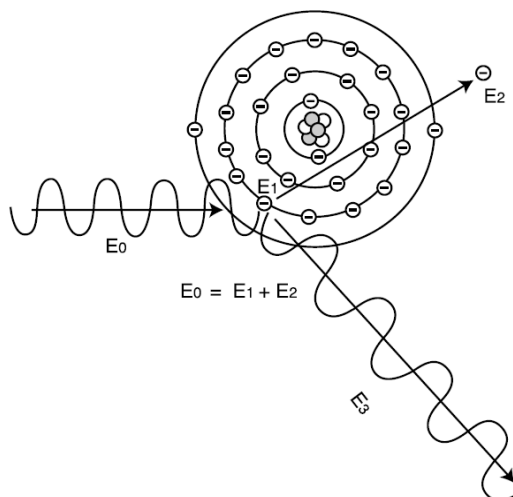
- Fotoelektrični efekt,
- Comptonov efekt,
- Tvorba para elektron- pozitron.

Kod fotoefekta, foton se sudara sa elektronom u omotaču i time mu predaje svu svoju energiju. Ako je ta energija veća od energije vezanja elektrona za atom, elektron se oslobađa iz atoma i odlazi, ostavljajući atom s jednim $+1$ nabojem. Dakle, događa se ionizacija, a foton nestaje. To se događa samo ako je energija fotona ispod određene granice, a ako je energija viša, dolazi do Comptonovog efekta. Efekt je ilustriran slikom 9 [7].



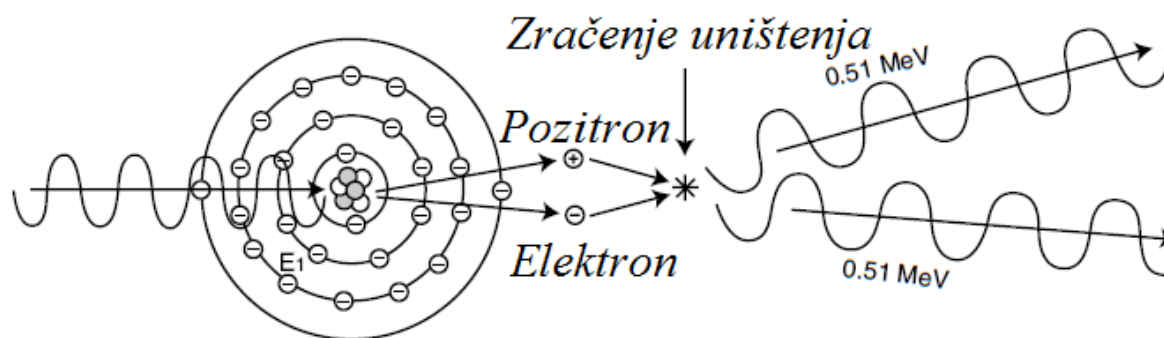
Slika 9. Fotoelektrični efekt [9]

Kod Comptonovog efekta se foton sudara s elektronom u omotaču, predaje mu dio svoje energije, izbacuje ga iz omotača i time ionizira atom, ali odlazi sa umanjenom energijom, raspršivši se pod nekim kutom. Time je energija zračenja samo smanjena, ali foton nije nestao. Na taj se način dobiva sekundarno ili raspršeno zračenje koje je veliki problem u zaštiti od zračenja. Comptonov efekt prikazan je slikom 10 [7].



Slika 10. Comptonov efekt [9]

Do tvorbe para elektron- pozitron dolazi kada je energija zračenja veća od određenog praga kojeg determinira Einsteinova formula. Prolazom takvog fotona visoke energije u blizini jezgre foton jednostavno nestane, a pojavi se par elektron- pozitron koji putuju u suprotnom smjeru, odnoseći preostalu energiju u smislu kinetičke energije koju sudarima prenose na druge elektrone. Proces je dočaran slikom 11 [7].



Slika 11. Tvorba para elektron- pozitron [9]

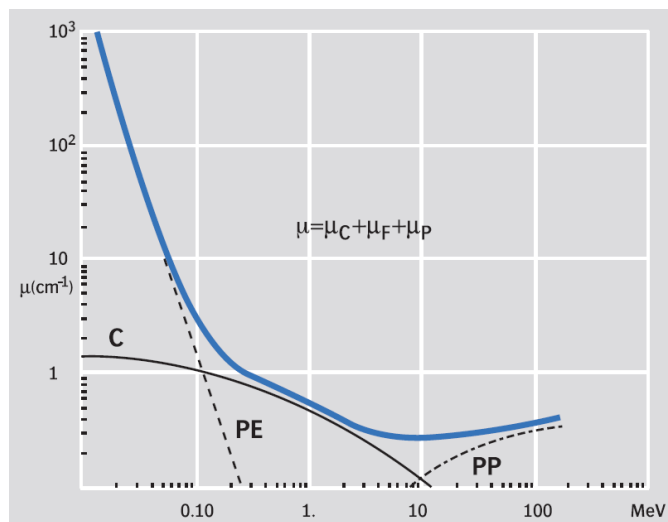
Očito je da tri gore navedena procesa smanjuju energiju upadnog x ili gama- zračenja. Kako se zračenje smanjuje prenošenjem energije na materiju, radi se o apsorpciji ili atenuaciji. Ona se izražava kroz linearni koeficijent prigušenja μ , kako je dano jednakošću (5).

$$\mu = \mu_C + \mu_F + \mu_P \quad (5)$$

Ovdje je:

- μ_C - prigušenje uslijed Comptonovog efekta,
- μ_F - prigušenje uslijed fotoelektričnog efekta,
- μ_P - prigušenje uslijed stvaranja para elektron- pozitron.

Slika 12 prikazuje utjecaj pojedinih efekata međudjelovanja zračenje- materija na linearni koeficijent prigušenja za čelik (PE - fotoelektrični efekt, C - Comptonov efekt, PP - stvaranje para elektron- pozitron) [3], [7].



Slika 12. Utjecaj efekata međudjelovanja na linearni koeficijent prigušenja za čelik [3]

Penetrativna snaga zračenja raste sa njegovom energijom (tvrdoćom; zračenje se smatra tvrdim pri niskim valnim duljinama, a mekim pri visokim). Odnos energije i snage penetracije kompleksne je naravi i rezultat je mehanizama koji uzrokuju apsorpciju zračenja.

Kada monokromatsko zračenje (homogeno, jedna valna duljina) intenziteta I_0 prođe kroz tvar, relativno smanjenje intenziteta $\Delta I / I_0$ proporcionalno je debljini Δt . Izraz (6) definira linearni koeficijent prigušenja (μ ; sačinjen od tri komponente- fotoelektričnog efekta, Comptonovog efekta i tvorbe para elektron- pozitron), dok jednačba (7) predstavlja drugačiji oblik zapisa (6).

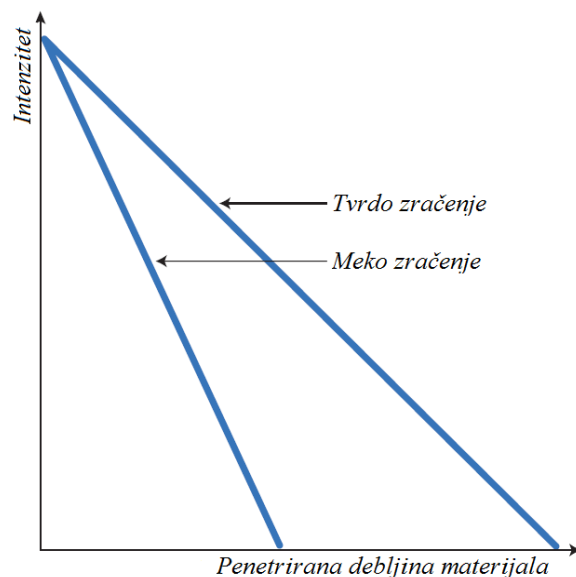
$$\frac{\Delta I}{I_0} = \mu \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot t} \quad (7)$$

Ovdje je:

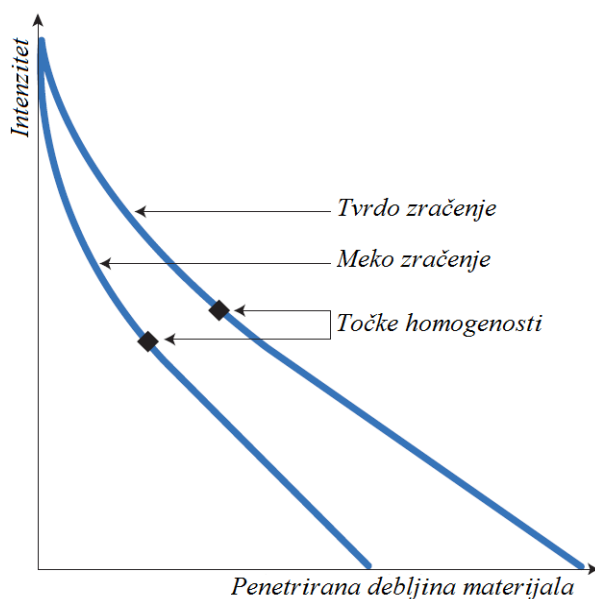
- I_0 - intenzitet zračenja kod ulaska u materijal,
- I - intenzitet zračenja kod izlaska iz materijala,
- μ - linearni koeficijent prigušenja,
- t - debljina materijala,
- e - baza prirodnog logaritma.

Slika 13 prikazuje rezultirajući intenzitet zračenja (logaritamski), kao funkciju povećane debljine materijala, i to za meko i tvrdo homogeno zračenje [3].



Slika 13. Intenzitet homogenog zračenja kao funkcija povećanja debljine materijala [3]

Kada zračenje nije homogene, već heterogene prirode, grafički je prikaz nešto drukčiji. Linije, naime, tada više nisu ravni pravci, nego blage krivulje (ilustrirano slikom 14). Nagib krivulje postaje postepeno plići (zbog selektivne apsorpcije mekšeg zračenja), sve dok se ne postigne točka homogenosti. Nakon te kritične točke, koeficijent prigušenja ostaje nepromijenjen (postaje konstantan), kao da je zračenje postalo homogeno. Samim time, od točke homogenosti nadalje, linije grafičkog prikaza ponovno postaju pravci [3].

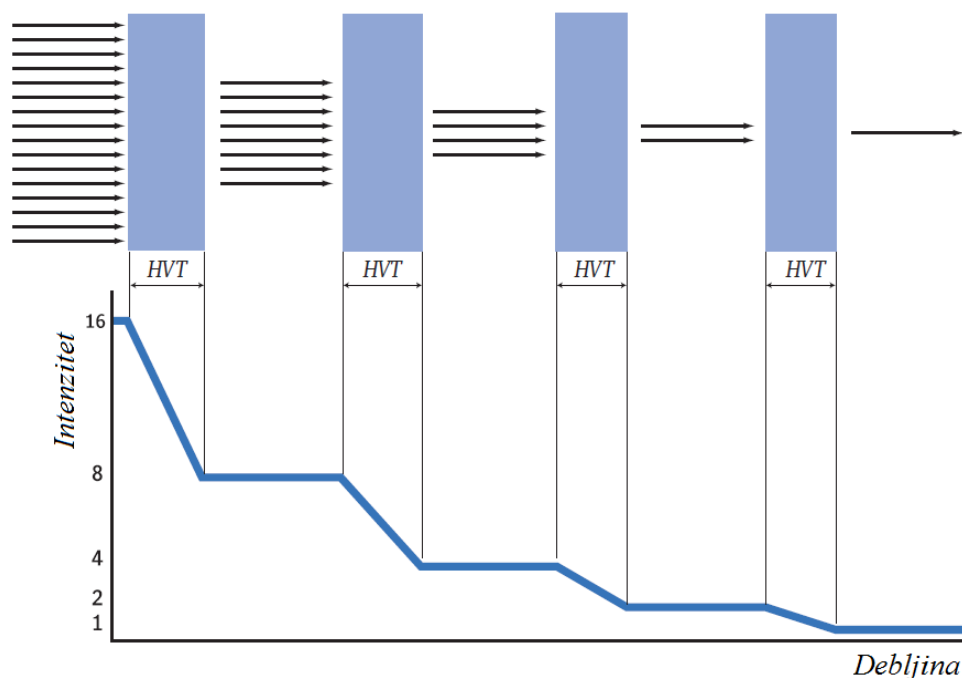


Slika 14. Intenzitet heterogenog zračenja kao funkcija povećanja debljine materijala [3]

Pozicija točki homogenosti je varijabilna i ovisi o samome izloženome materijalu. Kako slika 14 to zorno i dokazuje, veće debljine materijala bolje filtriraju meka zračenja (zračenja niske energije). Ta se pojava naziva očvršnuće (engl. *hardening*).

Svi materijali (primjerice, metalna ploča postavljena između izvora zračenja i filma) uzrokuju apsorpciju i filtriranje. Mjesto pozicioniranja te ploče ovdje igra veliku ulogu. Naime, metalna ploča postavljena ispred objektiva će očvršnuti zračenje uslijed filtriranja mekog zračenja. Stupanj očvršnuća zavisi od vrste i debljine materijala. Ova pojava nalazi primjenu pri smanjenju pretjeranog kontrasta kod radiografskih ispitivanja predmeta velikih različitosti u debljini. S druge strane, metalna ploča postavljena između ispitivanog predmeta i filma filtrira meko raspršeno zračenje (nastalo zbog Comptonovog efekta). Time se povećava kontrast i, analogno tome, kvaliteta slike. Ta se metoda primjene često koristi kod kobalta 60. Olovo, bakar i čelik dobri su filtrirajući materijali.

Za razliku od linearnog koeficijenta prigušenja, debljina poluapsorpcije materijala (engl. *half-value thickness*, HVT), kao pojam koji kvantificira penetrativnu snagu zračenja za određeni materijal, u svojoj je naravi izrazito praktična veličina. Definira se kao debljina određenog materijala koja je dostatna da se intenzitet zrake monokromatskog zračenja smanji na pola, kako sugerira slika 15. HVT- vrijednost ovisi o tvrdoći zračenja [3].



Slika 15. Ilustrativni prikaz debljine poluapsorpcije materijala [3]

Ako se ne radi o homogenom, već o heterogenom zračenju, HVT- vrijednost nije konstantna. Ipak, u industrijskoj praksi, gdje se koriste relativno tvrda zračenja, koriste se prosječne HVT- vrijednosti.

Tablica 2 prikazuje prosječne HVT- vrijednosti za olovo [3].

Tablica 2. Prosječne HVT- vrijednosti za olovo [3]

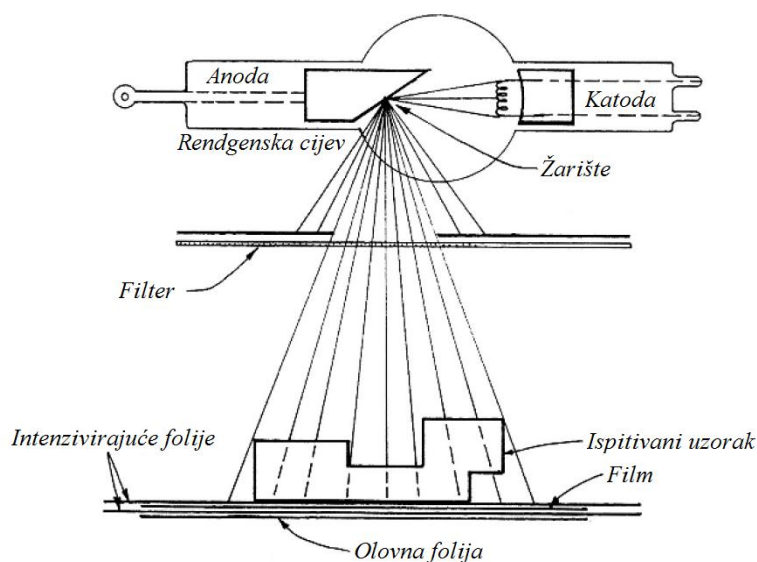
Izotop	Simbol	Prosječna energija, MeV	HVT, mm olova
<i>Cezij 137</i>	<i>Cs137</i>	0,66	8,4
<i>Kobalt 60</i>	<i>Co60</i>	1,25	13
<i>Iridij 192</i>	<i>Ir192</i>	0,45	2,8
<i>Selenij 75</i>	<i>Se75</i>	0,32	2
<i>Iterbij 169</i>	<i>Yb169</i>	0,2	1
<i>Tulij 170</i>	<i>Tm170</i>	0,072	0,6

2.2. Praktična izvedba radiografskog sustava

Za potrebe ovoga rada će se poimanje radiografskog sustava ograničiti na:

- Izvor zračenja,
- Filter,
- Foliju,
- Film.

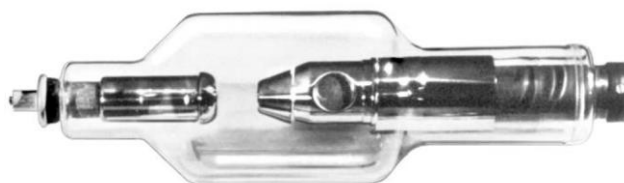
Takav je sustav, za radiografiju x- zrakama, deskriptivno dan slikom 16, a njegovi su dijelovi, izuzev folija koje će biti obrađene u zasebnoj točki, razrađeni u sljedećim poglavljima.



Slika 16. Radiografski sustav sa izvorom x- zraka [2]

2.2.1. Izvori x- zraka

Izvor x- zraka u industrijskoj radiografiji jest rendgenska cijev (slika 17). Ona je cijev načinjena od stakla ili keramike u koju su smještene anoda (pozitivna elektroda) i katoda (negativna elektroda), i to u uvjetima izrazito visokog vakuuma (10^{-9} hPa) [3].

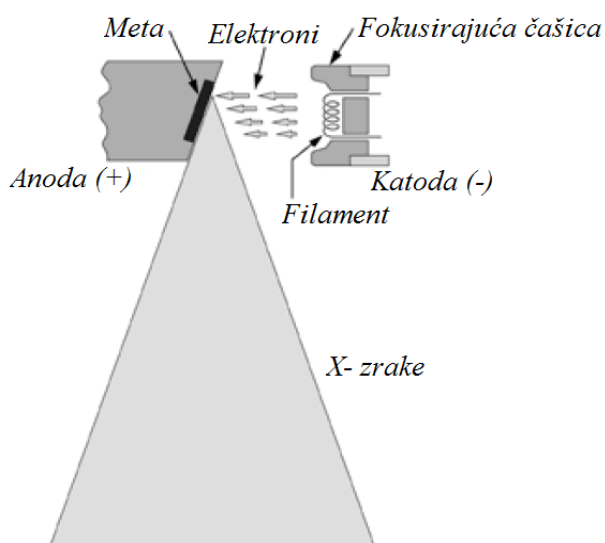


Slika 17. Rendgenska cijev [3]

Katoda se, kako to sugerira slika 18, sastoji od fokusirajuće čašice (engl. *focusing cup*), filameta (žarna nit) te izvora napajanja. Žarnu nit zagrijava nekoliko ampera nisko-naponskog izvora (najčešće mali transformator) čime se stvaraju elektroni koje privlači naboj anode. Fokusirajuća čašica koncentrira snop elektrona na maleni dio mete (engl. *target*) koji se naziva žarištem (engl. *focal spot*). Taj se snop elektrona naziva strujom cijevi, a njegova se jakost mjeri u redovima veličine miliampera. Što je temperatura filameta veća, veća je i količina elektrona što rezultira jačom strujom cijevi.

Kada se ubrzani elektroni sudare sa metom na anodi, veći dio njihove energije se pretvara u toplinu na području žarišne točke, a tek se mali dio energije pretvara u x- zračenje. Očita je potreba za anodom visoke temperature taljenja, pa se anode najčešće rade od volframa (taljenje na oko 3 400 °C). Anoda se mora hladiti. Mehanizmi kojima se to postiže, ovisno o izvedbi rendgenske cijevi, jesu:

- Zračenje,
- Konvekcija,
- Kondukcija,
- Prisilna cirkulacija kapljevine ili plina [3], [4].

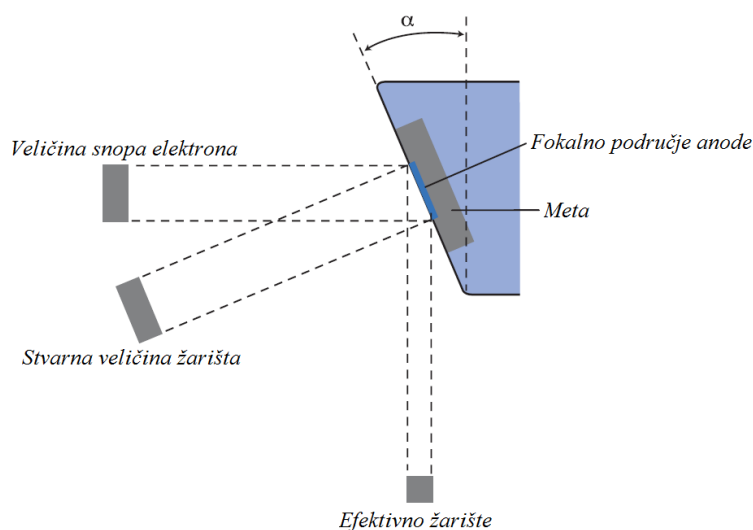


Slika 18. Katoda i anoda rendgenske cijevi [4]

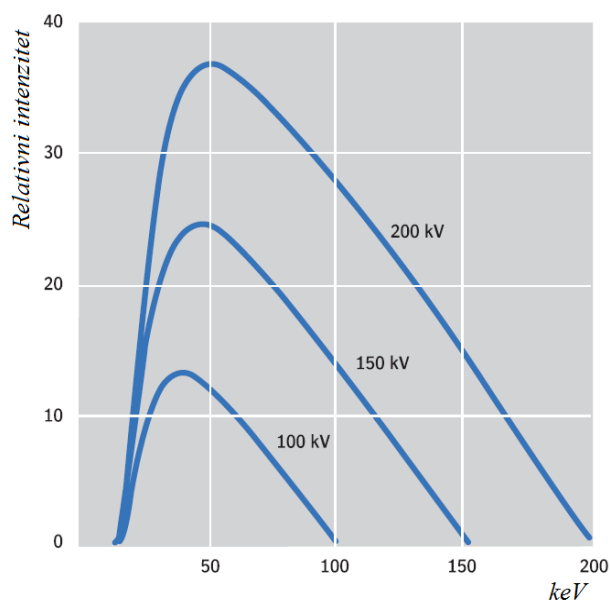
Veličina elektronskog snopa usmjerenog na metu razlikuje se od efektivne veličine žarišta. Efektivna veličina žarišta (prikazana slikom 19) je projekcija područja žarišta na površinu okomitu prema snopu x- zraka. Ona mora biti čim manja kako bi se postigla maksimalna oštrina dobivene slike. Uobičajene rendgenske cijevi imaju efektivnu veličinu žarišta od 4x4 mm do 1x1 mm, no postoje i cijevi kod kojih je ta veličina puno manja (promjer ispod 50 μm). Na veličinu žarišta utječu veličina fokalnog područja i vrijednost kuta α [3].

Napon rendgenske cijevi određuje energetska spektar i tvrdoću zračenja (slika 20), dok je intenzitet proporcionalan struji cijevi (slika 21). Promjena struje cijevi neće rezultirati promjenom energetskog spektra (tvrdoće zračenja). Na energetska spektar utječe i

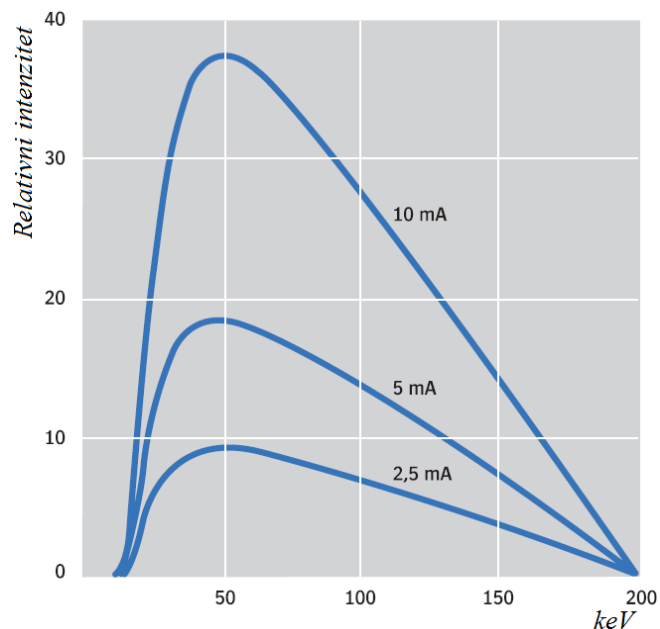
karakteristika apliciranog visokog napona. Ako se, naime, usporedi spektar dobiven konstantnim naponom sa spektrom dobivenim pulsirajućim naponom (pri istoj vrijednosti napona), oni će se blago razlikovati. Kod pulsirajućeg napona, u toku ciklusa, postoje intervali relativno niskog napona, za vrijeme kojih će se emitirati više mekih x- zraka. To znači da će konstantni napon pružiti veći intenzitet tvrdog zračenja nego pulsirajući napon, usprkos jednakoj nominalnoj vrijednosti napona [3].



Slika 19. Efektivna veličina žarišta [3]



Slika 20. Energetski spektar uz promjenjivi napon cijevi i konstantnu struju cijevi (ovdje 10 mA) [3]



Slika 21. Energetski spektar uz promjenjivu struju cijevi i konstantan napon cijevi (ovdje 200 kV) [3]

Uređaji za radiografsko ispitivanje x- zrakama se, generalno, dijele u tri naponske kategorije:

- Do 320 kV,
- Do 450 kV,
- Do 10 MeV.

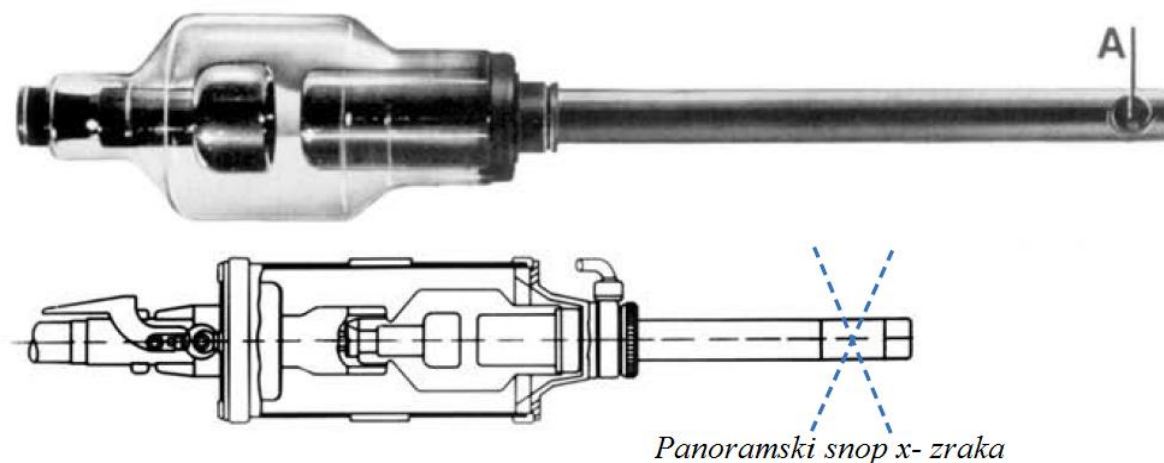
U naponsku kategoriju do 320 kV ulazi primjena x- zraka u uvjetima isprekidanog rada, uz mogućnost prenošenja opreme. Oprema napona do 450 kV se koristi kod kontinuiranog korištenja. Pri tome naponu oprema može biti polu- prijenosna ili u potpunosti stacionarna (zbog dimenzija i težine opremom je teško baratati). U slučajevima kada se ispituju predmeti ekstremno velike debljine koristi se megavoltna oprema (do 10 MeV). Ona je velikih dimenzija i težina, pa se koristi samo pri stacionarnom radu.

Prema obliku anode, rendgenske cijevi dijelimo na:

- Usmjerene cijevi (engl. *directional tube*, zračenje se emitira samo u jednome smjeru),
- Panoramske cijevi (engl. *panoramic tube*, zračenje se emitira kružno; slika 22) [3].

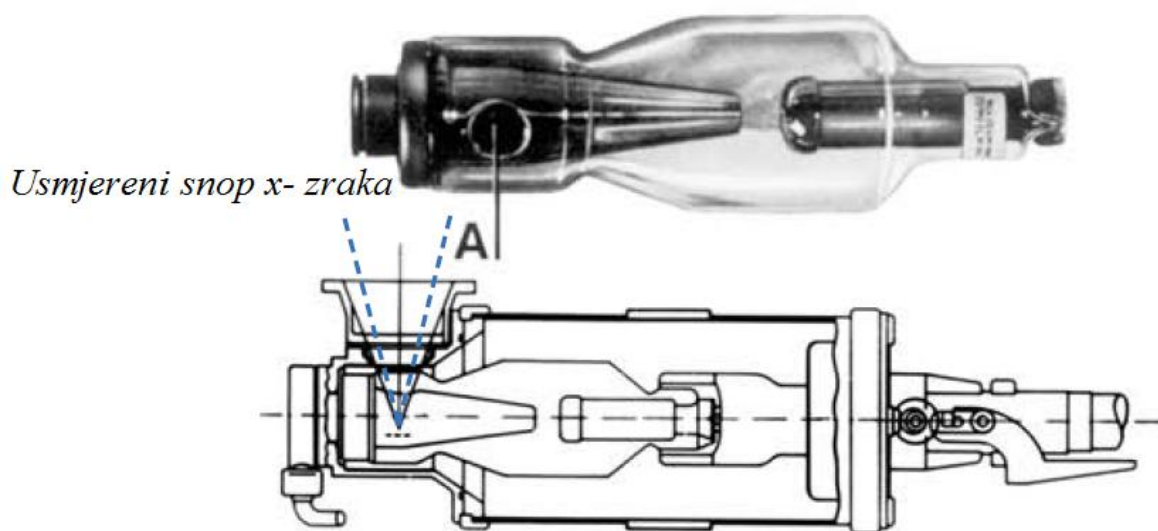
S obzirom na broj polova, rendgenske su cijevi:

- Unipolarne (engl. *unipolar tubes*),
- Bipolarne (engl. *bipolar tubes*).



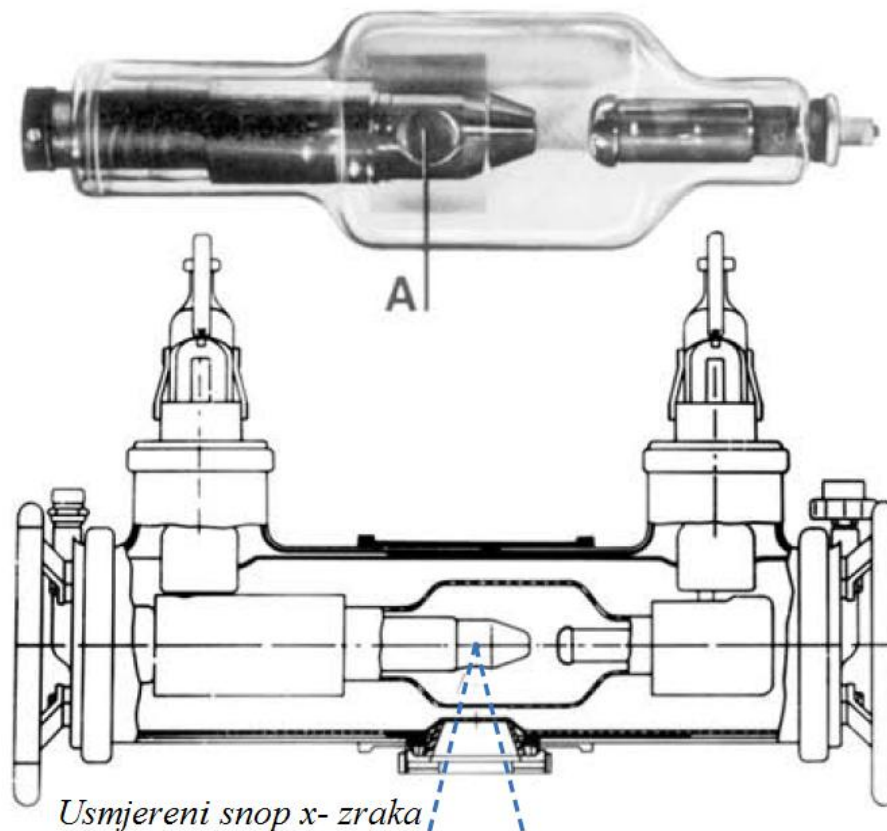
Slika 22. Panoramska rendgenska cijev sa šupljom anodom [3]

Unipolarne rendgenske cijevi su uzemljene samo na anodi. To uvelike olakšava hlađenje anode. Izlazni je otvor zračenja postavljen asimetrično što se u praksi može pokazati vrlo korisnim. Na slici 23 nalazi se primjer unipolarne rendgenske cijevi [3].



Slika 23. Unipolarna rendgenska cijev [3]

Za razliku od unipolarnih cijevi, bipolarne cijevi (slika 24) imaju dvije točke uzemljenja- katodu i anodu (električni potencijal je, u odnosu na zemlju, i na anodi, i na katodi jednak polovici napona cijevi, što je izvanredno sa stajališta izolacije). Prozor za izlaz zračenja smješten je na sredini cijevi. Hlade se zrakom, uljem ili vodom [3].

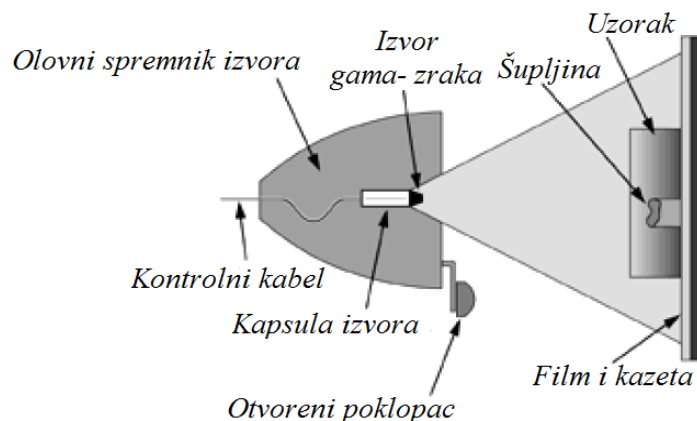


Slika 24. Bipolarna rendgenska cijev [3]

Pored ovih (uobičajenih) izvedbi rendgenskih cijevi, postoje i one specifične. Unipolarne panoramske rendgenske cijevi sa dugom šupljom anodom koriste se pri radiografskom ispitivanju cijevi ili spremnika. Pružaju pregled nad svih 360° unutrašnjosti ispitivane šupljine, pa su idealne za ispitivanje zavara. Postoje i panoramske rendgenske cijevi kod kojih se snop elektrona fokusira pomoću magnetske ili elektrostatičke leće, a u svrhu dobivanja što manjeg žarišta. One rezultiraju iznimno oštrom radiografskom snimkom, ali se, uslijed pregrijavanja, anoda mora često mijenjati. Također, u radiografiji plastike ili aluminija koriste se cijevi opremljene berilijevim prozorom za izlaz zračenja. On dopušta prolaz mekšem zračenju, generiranom pri nižim naponima cijevi (5 kV do 45 kV) [3].

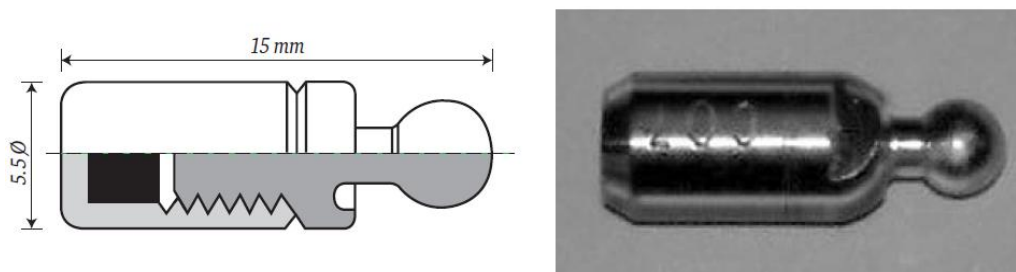
2.2.2. Izvori gama- zraka

Velika je prednost industrijske radiografije gama- zrakama, uz kompaktnost izvora zračenja i neovisnost sustava o vanjskom energetsom izvoru, izvedbena jednostavnost korištene konstrukcije (dana slikom 25). Ona se, generalno, sastoji od kućišta, mehanizma za pozicioniranje kapsule i samog izvora gama- zračenja [4].



Slika 25. Izvedba konstrukcije izvora gama- zraka [4]

Kapsula je hermetički zatvoreni držač izvora zračenja. Načinjen je od monela (specijalna vrsta legure nikla), vanadija ili titana te je otporan na koroziju. Vanjske su dimenzije cilindrične kapsule oko 5,5x15 mm (slika 26), dok je veličina samog izvora 1 do 4 mm [3].



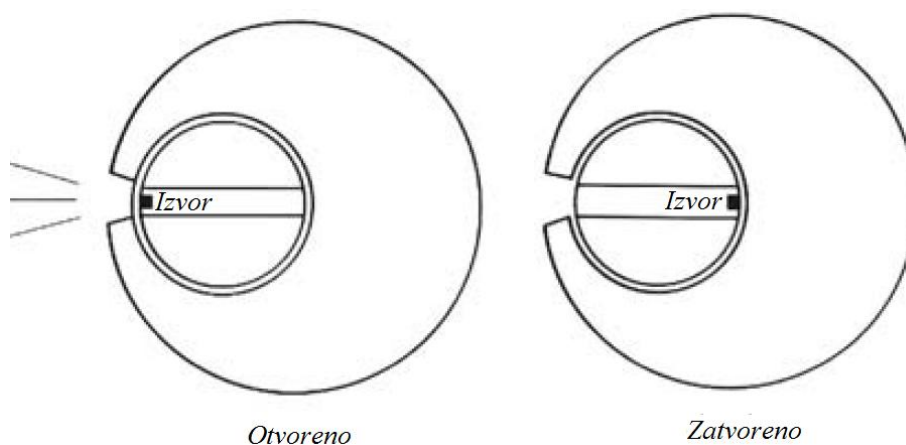
Slika 26. Kapsula gama- izvora [3]

Kućište olakšava (i osigurava) transport izvora zračenja i rukovanje njime. Kako izvor, prema svojoj prirodi, konstantno emitira zračenje u svim smjerovima, kućišta podliježu rigidnim internacionalnim sigurnosnim pravilima. Tokom transporta i korištenja, izvor gama- zraka mora biti okružen materijalom koji apsorbira zračenje (koje se, time, zadržava u kontejneru). Razina zračenja na vanjskoj strani kućišta ne smije prijeći nadležnim zakonom dopuštenu maksimalnu razinu radioaktivnosti.

Baš kao i transportno kućište, i ekspozicijsko kućište (kamera) mora biti robusno izvedeno. Ono mora zadovoljiti uvjete otpornosti na vodu, prljavštinu i udarce ili padove. Materijal takovog kućišta nerijetko je olovo, ali se koristi i osiromašeni uran. Neovisno od materijala izrade, sva su kućišta primjetne težine.

Postoji nekoliko izvedbenih rješenja problema sigurne upotrebe, rukovanja i čuvanja izvora. Dvije najčešće korištene varijante jesu:

- Izvor je postavljen u rotirajući cilindar (razjašnjeno slikom 27),
- Kontejner sa S- kanalom [3].

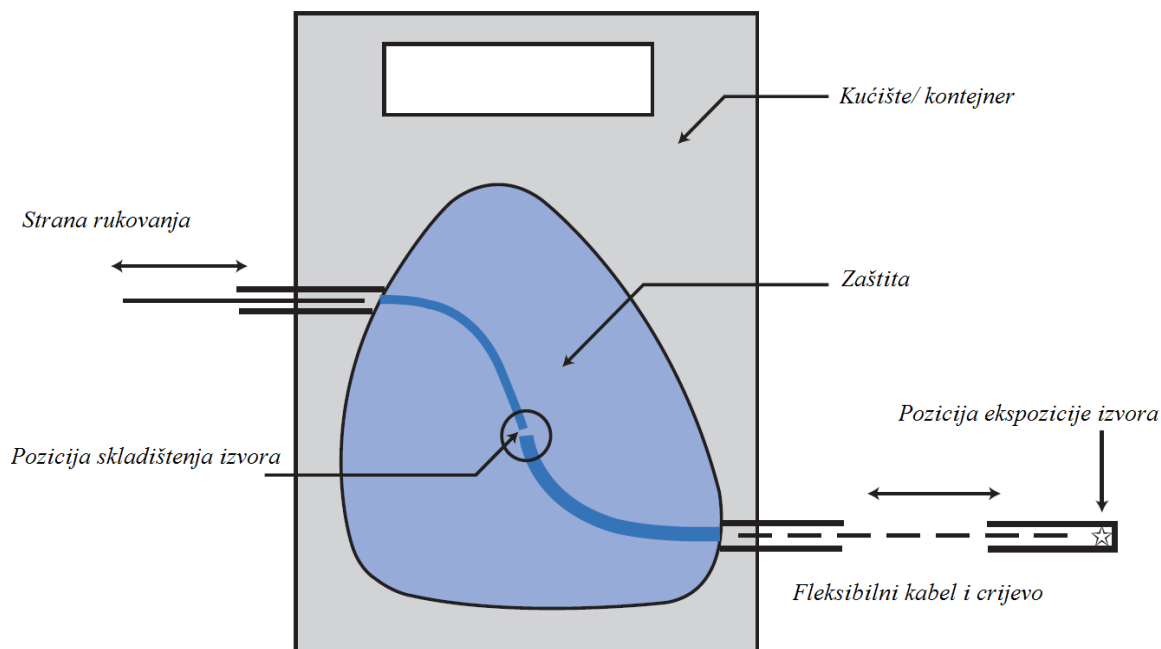


Slika 27. Izvor zračenja postavljen u rotirajućem cilindru [3]

Kontejner sa S- kanalom (moderna izvedba prikazana slikom 28) pruža opciju pomicanja izvora gama- zraka iz daljine (daljina je, između ostalog, najbolja zaštita protiv zračenja). Ovo se uobičajeno rješava pomoću fleksibilnog kabla postavljenog u crijevo. Takvom se konstrukcijom izvor može, uz veliku dozu sigurnosti po zdravlje ispitivača, pomaknuti i nekoliko metara izvan kontejnera (u najpovoljniji ekspozicijski položaj). Princip rada kontejnera s S- kanalom dan je slikom 29 [3].



Slika 28. Moderna izvedba radno- transportnog kontejnera sa S- kanalom [3]



Slika 29. Princip rada kontejnera sa S- kanalom [3]

2.2.3. Radiografski filteri

U radiografskoj primjeni, filteri su materijali koji se postavljaju u putanju zračenja kako bi apsorbirali zračenje ili modificirali spektar zračenja [10].

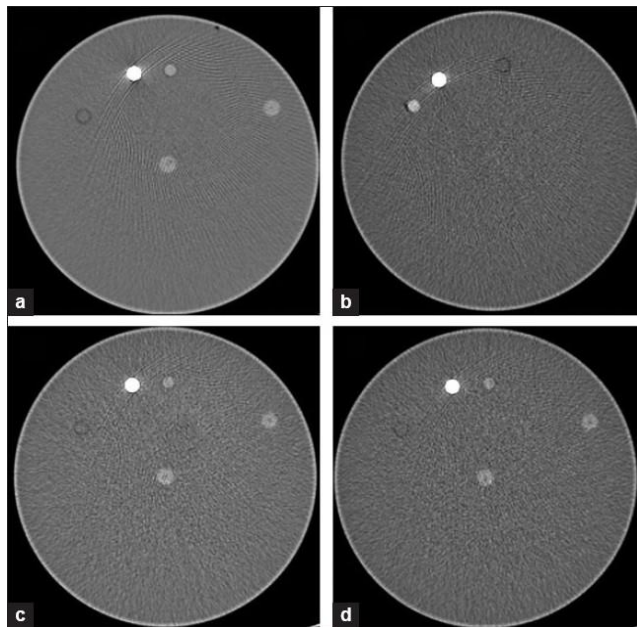
Kada metalnu ploču (obično olovo, mjed ili bakar) postavimo između izvora zračenja i ispitivanog predmeta, dolazi do očvrnuća zračenja čime se smanjuje kontrast dobivene snimke. Tome se može kontrirati postavljanjem metalnog filtra neposredno iza objekta (odnosno, između ispitivanog objekta i filma). Filtar uzrokuje da se (mekša) raspršena radijacija koja prolazi kroz predmet apsorbira u filter, i to u jačoj mjeri nego primarno (tvrde) zračenje. Kao rezultat toga, nastaje slika bolje kvalitete [3], [10].

Filtracijom se kontrast može i smanjiti. Tome se pribjegava kada se jednim filmom nastoji radiografski ispitati predmet izrazito varijabilne debljine.

Tipične su debljine filteri:

- 0,1 do 0,25 mm olova za 300 kV izvore zračenja,
- 0,25 do 1,0 mm olova za 400 kV izvore zračenja [3].

Primjer utjecaja filtra na kvalitetu radiografske snimke dan je slikom 30.



Slika 30. Utjecaj korištenja filtra na kvalitetu dobivene radiografske snimke [11]

2.2.4. Filmovi

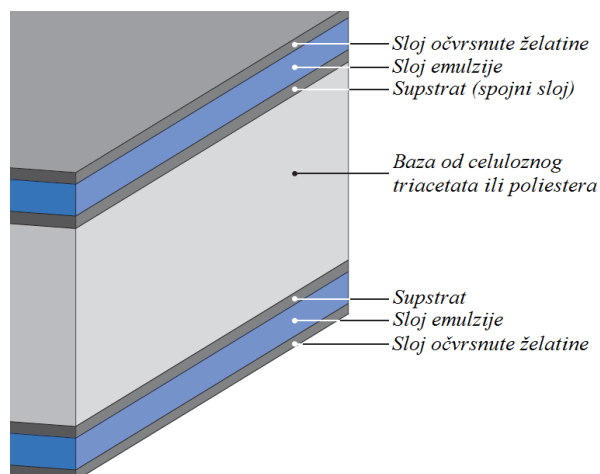
Radiografski je film načinjen od 7 slojeva, do ukupne debljine od oko 0,5 mm. Ti su slojevi (u skladu sa slikom 31):

- Prozirna baza od celuloznog triacetata ili poliestera (na nju su, sa obje strane, nanijeti ostali slojevi te ona ima funkciju njihova podupiranja),
- Sloj očvrsnute želatine koji štiti emulziju,
- Sloj emulzije osjetljiv na zračenje,
- Iznimno tanak supstrat koji spaja sloj emulzije sa bazom [3], [13].

Uobičajeni radiografski film ima dva sloja emulzije, čime se brzina udvostručuje spram filmova sa jednim emulzijskim slojem. Ovdje je emulzija spoj osjetljiv na ionizirajuće zračenje i svjetlost, a sastoji se od mikroskopskih čestica kristala srebra halida (engl. *silver halide*; spojevi srebra i halogenih elemenata, kao što su AgBr, AgCl, AgI i sl.) suspendiranih želatinom [3], [14].

Baza filma daje strukturalnu čvrstoću filmu. Pored toga, baza mora biti fleksibilna zbog lakšeg razvijanja te dimenzijski stabilna tokom vremena [14].

Glavne su značajke radiografskoga filma njegova optička gustoća i kontrast snimke koji se postiže [3].



Slika 31. Shematski presjek radiografskog filma [3]

Kada se film postavi na iluminator, primjećuju se područja različite razine svjetlosti, zavisno od lokalne optičke gustoće (količine čestica srebra) razvijene emulzije. Optička gustoća (D) definira se kako je dano izrazom (8), a mjeri ju denzitometar (primjer je prikazan slikom 32). Vrijednosti optičke gustoće koje se javljaju u industrijskoj radiografiji protežu se u rasponu od 0 do 4.

$$D = \log \frac{I_0}{I_t} \quad (8)$$

Ovdje je:

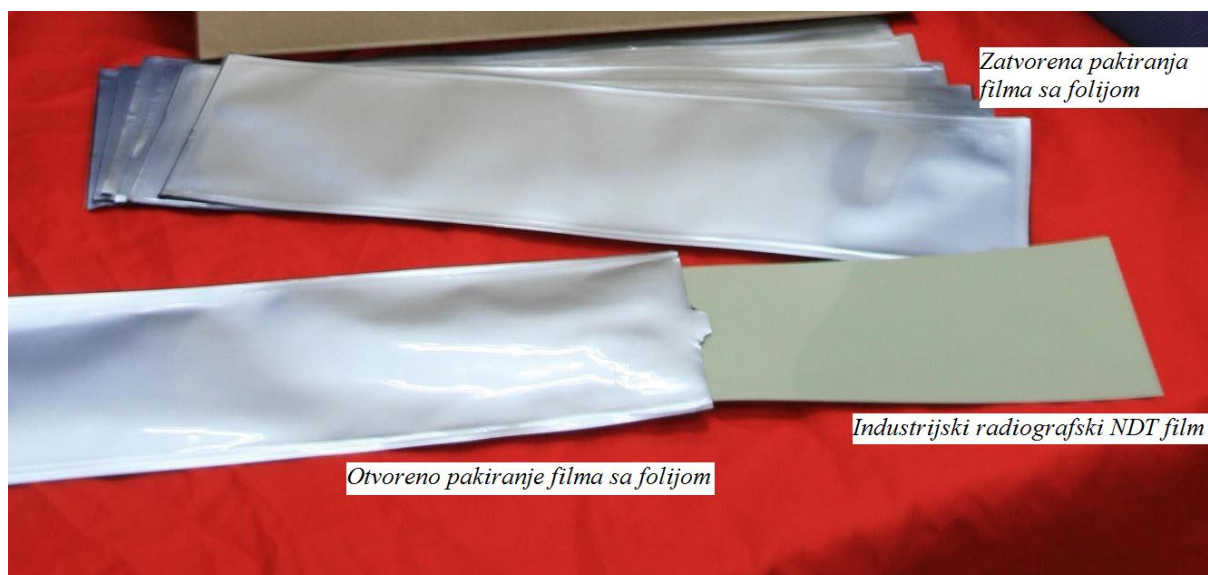
- D - optička gustoća,
- I_0 - upadna svjetlost,
- I_t - svjetlost transmitirana kroz film [3].



Slika 32. Denzitometar [15]

Kontrast slike se definira kao relativna razlika osvjetljenja slike i njene pozadine. Kontrast između dvaju optičkih gustoća $D1$ i $D2$ na radiografskom filmu jest razlika njihovih optičkih gustoća te se uobičajeno naziva radiografskim kontrastom. Odnos ekspozicije i rezultirajuće gustoće se, u radiografiji, često naziva brzinom filma.

Filmovi se, prema rastućoj brzini, kategoriziraju u $C1$, $C2$, $C3$, $C4$, $C5$, $C6$ i $C7$ filmove. Radiografski filmovi se pakiraju u posebnu ambalažu (primjerom ilustrirano slikom 33), često pod vakuumom, kako bi ih se zaštitilo od svjetlosti, ali i drugih neželjenih utjecaja [14].



Slika 33. Primjer pakiranja radiografskog filma [14]

3. POJAČAVAJUĆE FOLIJE

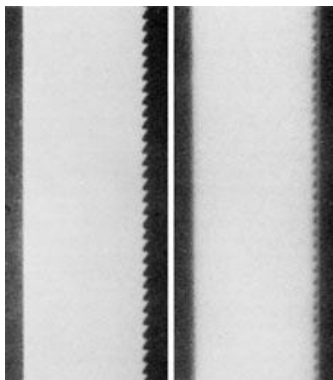
Kada x ili gama- zraka dopre do filma, on obično apsorbira tek 1 % energije, dok ostatak prolazi kroz film. Kako formiranje i kvaliteta radiografskog snimka primarno ovisi o apsorbiranom zračenju, može se zaključiti kako ta ostala energija ne čini nikakav koristan rad. Kako bi se ta potrošena energija utilizirala, koriste se pojačavajuće folije (engl. *intensifying screens*) između kojih se postavlja radiografski film. Folije se, prema materijalu od kojeg su načinjene, dijele na:

- Olovne folije,
- Fluorescentne folije,
- Fluorometalne folije [3], [4].

Pod utjecajem x i gama- zračenja, olovne folije emitiraju elektrone na koje je film osjetljiv, što je izrazito koristan efekt sa stajališta radiografskog industrijskog ispitivanja. U svrhu dobivanja pojačanja intenziteta i do 4 puta, film se postavlja između dva sloja olova. Radni su uvjeti zadani energetske rasponom od 80 keV do 420 keV, a proces se može podjednako primijeniti i kod x, i kod gama- zračenja.

Debljina prednje olovne folije (folija na strani izvora) mora odgovarati tvrdoći korištenog zračenja, kako bi se propustila primarna radijacija, a čim više zaustavila sekundarna radijacija (koja je, po svojoj naravi, veće valne duljine i, samim time, manje penetrativna). Prednja folija, dakle, ne služi samo kako bi pojačala intenzitet primarnog zračenja, već i kako bi apsorbirala mekše raspršeno zračenje. Debljina prednje folije uobičajeno iznosi od 0,02 do 0,15 mm, dok debljina stražnje folije nije od presudne važnosti, pa često iznosi oko 0,25 mm.

Površina olovne folije je izrazito fina (postiže se poliranjem), kako bi se omogućio što bolji kontakt između površine i filma. Takav kontakt dati će oštiju sliku (lijevi primjer na slici 34), dok će slabiji kontakt rezultirati nejasnijom i mutnijom snimkom (desni primjer na slici 34). Finoća površine olovne folije je bitna i stoga što bi se, u slučaju postojanja kakvih pukotina ili ogrebotina na foliji, iste vidjele i na radiografskom snimku (slika 35- engleske riječi *front* i *back* grebanjem su ispisane na prednju i stražnju olovnu foliju) [3].

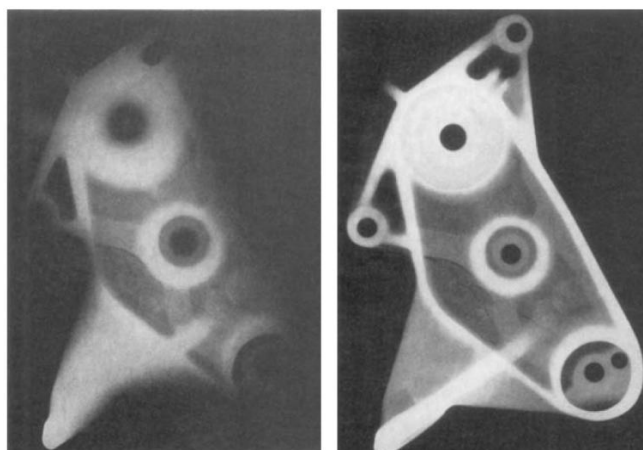


Slika 34. Utjecaj kontakta između olovne folije i filma na kvalitetu radiografske snimke [4]



Slika 35. Utjecaj izgrebane olovne folije na rezultirajuću radiografsku snimku [4]

Slika 36 vjerno dočarava prednosti efekta korištenja olovne folije (lijevi, slabiji prikaz dobiven je bez olovne folije, dok je onaj desni, kvalitetniji, dobiven uz olovnu foliju).



Slika 36. Radiografski snimak odljevka dobiven bez olovne folije i sa njenim korištenjem [3]

Olovo nije najbolji materijal za pojačavajuće folije kada se radi o visoko-energetskim zračenjima. Uz gama- zračenje kobalta 60 i x- zrake izuzetno visokih energija (5 do 8 MeV), bakrene i čelične folije pružaju puno kvalitetnije rezultate od bilo koje debljine olovnih folija.

Kod fluorescencije, određene kemijske supstance, uslijed utjecaja elektromagnetskog zračenja, trenutno počinju emitirati svjetlost. Efekt prestaje istoga trena kada nestane i zračenja. Fluorescentna folija sadrži tanku, fleksibilnu bazu prevučenu fluorescentnim slojem kojeg sačinjavaju mikro- kristali odgovarajuće metalne soli (uobičajeno CaWO_4) koji svijetle pri izloženosti zračenju. Pomoću ovakvih se folija intenziteti zračenja mogu povećati i do 50 puta, što značajno smanjuje vrijeme ekspozicije. Ipak, zbog smanjenja oštrote slike, sama kvaliteta radiografske snimke pati. Iz tog se razloga fluorescentne folije u industrijskom okruženju koriste jedino kod detekcije vrlo velikih nepravilnosti i u slučaju potrebe drastično malog vremena ekspozicije (velika žurba) [3].

Fluorometalne folije (engl. *fluorometallic screens*), u određenoj mjeri, spajaju prednosti fluorescentnih i olovnih folija. Sastoje se od CaWO_4 sloja kombiniranog sa slojem olova. Kvaliteta dobivene radiografske snimke je neusporedivo bolja od kvalitete one dobivene korištenjem fluorescentnih folija, a jaki kontrast (koji nastaje kao rezultat emitiranja svjetlosti) povećava osjetljivost na indikacije. Također, u odgovarajućim radnim uvjetima i korištenjem prikladnog filma F- tipa, vrijeme ekspozicije može biti čak 5 do 10 puta manje spram vremena ekspozicije potrebnog uz upotrebu D7 filma i olovne folije (tablica 3) [3], [12].

Tablica 3. Usporedba vremena ekspozicije olovne i fluorometalne folije [3]

Film- folija sustav	Relativno vrijeme ekspozicije	
	200 kV	Ir192 (450 kV)
F6+ RCF folije (fluorometalne)	0,1	0,2
D7+ Olovne folije	1,0	1,0

4. RAČUNALNA RADIOGRAFIJA

Kao i kod ostalih metoda nerazornih ispitivanja, razvoj mikroprocesora i računala rezultirao je velikim promjenama radiografskih ispitivanja. Za razliku od analogne, digitalna radiografija dopušta naknadnu (engl. *postprocessing*) obradu dobivene digitalne radiografske slike, i to uz pomoć posebnih programskih paketa koji omogućavaju evaluaciju dobivenih vrijednosti [3], [16].

Digitalne radiografske metode su tehnike snimanja kod kojih radiografski snimak ne nastaje izravnim djelovanjem rendgenskih zraka na rendgenski film, nego obradom digitaliziranih ulaznih analognih dijagnostičkih informacija. Ulazne se informacije digitaliziraju u analogno-digitalnom pretvaraču (pretvaraju se u broječne podatke), koji se, nakon kompjuterske obrade, prikažu slikom na zaslonu. Kod novijih digitalnih uređaja, na monitorima se dobiva izravan prikaz digitalne slike. Digitalna slika sastavljena je od piksela, a oni su rezultat informacija dobivenih iz volumnih elemenata slike. Digitalna je slika, dakle, sastavljena od digitalne matrice (odnosno, mreže jednakog broja horizontala i okomica binarnih veličina), a ti brojevi predstavljaju vrijednosti u izvorištu analognih informacija.

Neke od prednosti digitalnih radiografskih metoda su:

- Veći dinamički raspon,
- Mogućnost mjerenja pojedinih dijelova snimanog objekta,
- Mogućnost naknadne obrade dobivene slike,
- Arhiviranje slike na optički disk [17].

Mogu se identificirati tri osnovne digitalne metode radiografije:

- Digitalizacija konvencionalnih radiografskih filmova u svrhu arhiviranja ili vizualne manipulacije,
- Računalna radiografija (engl. *computed radiography*, CR), odnosno digitalna radiografija pomoću polu- fleksibilnih fosforom prevučenih slikovnih ploča (uz računalnu obradu),
- Direktna radiografija (engl. *direct radiography*, DR) kod koje se digitalna slika dobiva pomoću ravnih detektora [3], [16].

Računalna radiografija (prvo uvedena u medicinu oko 1980. godine te je, kao takva, jedna od najstarijih i najčešće korištenih metoda digitalne radiografije) naziv je za tehnologiju koja

omogućava snimanje radiograma na slikovne ploče koje sadrže fotosenzitivni sloj fosfora. Slikovna ploča tada se očitava pomoću specijalnog laserskog skenera. Digitalni zapis radiograma moguće je pohraniti i analizirati na računalu te prikazati na monitoru visoke rezolucije. Ovakvi sustavi imaju vrlo velik dinamički raspon u odnosu na klasični film i značajno su osjetljiviji na zračenje (potrebno je manje zračenja), čime se skraćuje potrebno vrijeme ekspozicije [17], [18], [19].

Snimanje radiograma CR sustavima je proces koji se sastoji od dva koraka. Slika se ne formira direktno, već kroz međukorak, kako je slučaj i kod klasičnog filma. Slika se kasnije pretvara u svjetlost stimulacijom na laserskom skeneru te se tako dobiva slika u računalnom formatu. Za razliku od klasičnog filma, gdje se latentna slika sprema u srebro- halidne kristale te se razvija kemijski, kod sustava za računalnu radiografiju se latentna slika sprema u fotosenzitivni sloj fosfora [3], [18].

Važnost se računalne radiografije iščitava u činjenici da omogućava kvalitetniju obradu radiograma. Računalo se koristi kako bi se digitalni zapis radiograma obradio na način koji omogućava najveću razinu kvalitete prikaza, što kod uobičajenog pregleda radiograma na iluminatoru nije bilo moguće.

Računalna radiografija danas, u sve većoj mjeri, pronalazi primjenu u raznim granama industrije te uspješno zamjenjuje (već pomalo zastarjelu) industrijsku radiografiju pomoću filma. Razlog tome je širok spektar mogućnosti i poboljšanja koja računalna radiografija nudi. Ipak, računalna radiografija ima i neke mane:

- Ručno rukovanje slikovnim pločama,
- Ne postoji suglasnost vodećih proizvođača opreme oko procedura,
- Ne postoje standardi kvalitete (rezolucije slike) za opću radiografiju,
- Cijena slikovnih ploča,
- Slikovne ploče mogu se oštetiti.

U industriji se računalna radiografija primjenjuje u brojnim prilikama. Neke od najznačajnijih primjena su:

- Ispitivanje odljevaka,
- Ispitivanje korozije na cijevima,
- Ispitivanje korozijskih oštećenja na ventilima,

- Provjera stanja ventila,
- Ispitivanje zavora [18].

Područje računalne radiografije normativno uređuju EN 14784- 1: 2007 (*Non destructive testing- Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates- Part 1: Classification of systems*) i EN 14784- 2: 2007 (*Non destructive testing- Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates- Part 2: General principles for testing of metallic materials using X- rays and gamma rays*) [3], [20].

U daljnjem će se tekstu obraditi sustav računalne radiografije te njegovi pojedini gradivni dijelovi.

4.1. Dijelovi sustava računalne radiografije

Oprema za računalnu radiografiju varira od malih prijenosnih skenirajućih uređaja do velikih uređaja koji su sposobni procesuirati i do 200 radiograma po satu. Cjeloviti se sustav sastoji od:

- Izvora zračenja,
- Slikovne ploče,
- Skenera,
- Monitora visoke razlučivosti,
- Računala,
- Periferije (tipkovnica i miš),
- Programskog paketa za obradu slike.

Kako su izvori zračenja već obrađeni u ranijim poglavljima ovoga rada, a računalne komponente i periferija (iako jesu važne) svojim specifikacijama ne igraju veliku ulogu u procesu računalne radiografije, u daljnjim će se točkama jezgrovitije obraditi slikovne ploče te mogućnosti skenera.

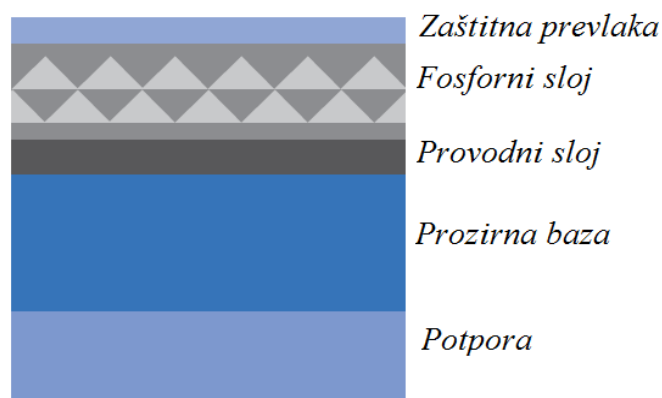
4.1.1. Slikovne ploče

Kako je već ranije rečeno, računalna radiografija koristi posebne ploče (engl. *image plate*) za snimanje radiograma umjesto filma. Tehnologija izrade takovih ploča datira iz 1975. godine.

Fleksibilne fosforne slikovne ploče (presjek dan slikom 37) izgledom su nalik na standardni radiografski film. Sastoje se od fosfornog sloja finih zrnaca, kristala barijevog

fluorhalogenida, koji apsorbiraju dvovalentni europij (Eu^{2+}). Kada je fosfor u slikovnim pločama izložen ionizirajućem zračenju, elektroni se u ploči pobuđuju te prelaze u viši energetske nivo u kojem postaju zarobljeni u halidnim prazninama. Na taj se način tvori latentna slika ispitivanog uzorka koja je stabilna nekoliko dana.

Prolaskom laserske zrake kod skeniranja, laserska zraka infracrvenog spektra izbacuje elektrone iz skladišta (pobuđuje ionizirani fosforni sloj), pri čemu se emitira plava svjetlost koju očitava fotodioda. Razlike u zacrnjenju pojedinog dijela radiograma daju sliku te stvaran uvid u stanje ispitivanog uzorka. Očitani se „film“ briše izlaganjem jakoj svjetlosti i može se odmah ponovno rabiti [3], [17], [18].



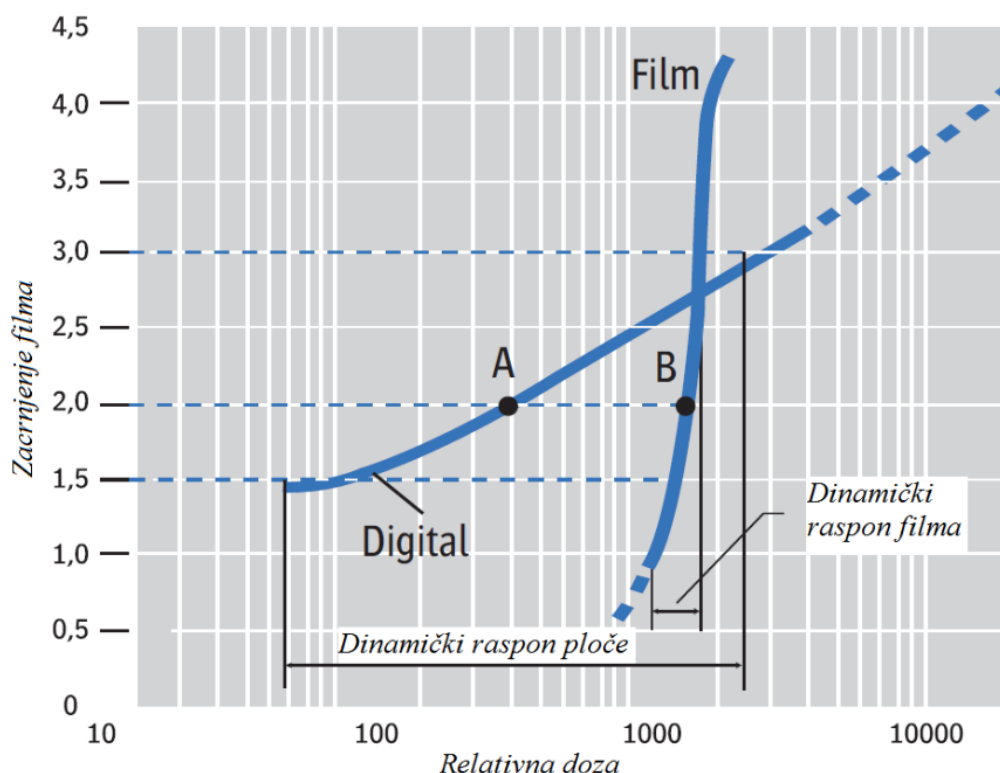
Slika 37. Presjek slikovne ploče [3]

Ploče se mogu razlikovati prema debljini fosforescentnog sloja. Deblji slojevi su osjetljiviji, ali, u konačnici, daju manju oštrinu zbog raspršenja stimulirajućeg zračenja. Stoga se podešavanjem debljine fosfornog sloja može izbalansirati oštrina i osjetljivost te postići standardni ili visoko- rezolucijski zaslon. Također, kada se postigne optimalna debljina fosforescentnog sloja, daljnje povećanje debljine rezultirat će minimalnim učinkom na povećanje efikasnosti i oštrine [18], [19].

Kako na to ukazuje slika 37, izuzev sloja fosfora postoje i zaštitni slojevi te dodatni potporni laminatni sloj koji određuje mehanička svojstva poput fleksibilnosti.

Velika je prednost slikovnih ploča ta što omogućuju da se u istom snimanju ispituju objekti međusobno velikog raspona debljina ili objekti od različitih materijala. Time nestaje potreba za postavljanjem ekspozicije većeg broja puta što, konsekvntno, znači uštedu vremena i novca.

Veći dinamički raspon slikovnih ploča osigurava da one lakše dođu u područje zasićenja, pa je odnos zacrnjenja prema relativnoj ekspoziciji linearan, dok je, kod konvencionalnih radiografskih filmova, taj odnos eksponencijalnog karaktera. Ova je razlika ilustrirana slikom 38. Vidljivo je da, kod običnog filma, uz primjerenu dozu ekspozicije, dolazi do manje promjene kontrasta. Ipak, kako krivulja običnog filma naglo postaje strma, mala će promjena ekspozicije filma naglo dovesti do velikog kontrasta. S druge strane, kod slikovnih je ploča ta promjena linearne naravi. I dok će, uz pogađanje uskog strmog dijela krivulje, uobičajeni radiografski film pružiti veći kontrast, prednost linearne karakteristike slikovnih ploča leži u spoznaji da su one manje osjetljive na parametre snimanja, što, pak, znači da se, njihovom upotrebom, neće događati greške i, njima izazvana, ponavljanja snimanja. Sumirano, to bi značilo da će sveukupno vrijeme ispitivanja slikovnim pločama biti manje (zbog manjeg broja ponavljanja snimanja uslijed netočno odabranih parametara), čime će se smanjiti i troškovi [18].



Slika 38. Usporedba odnosa zacrnjenja i doze filma i slikovne ploče [3]

Kako bi se ilustrirao stvarni izgled slikovne ploče, slikom 39 prikazana je otvorena CR kazeta sa pločom.



Slika 39. Otvorena CR kazeta sa slikovnom pločom [3]

S obzirom na to da su u praktičnome dijelu ovoga rada korištene Kodak Industrex slikovne ploče, u narednoj će im točki biti posvećena posebna pažnja.

4.1.1.1. Kodak Industrex slikovne ploče

Kodak Industrex Flex GP, HR i XL Blue slikovne ploče (slika 40) specijalno su osmišljene za upotrebu pri kontroli bez razaranja. Njihova se upotreba, između ostalih primjena, preporuča prilikom ispitivanja:

- Odljevaka,
- Erozijske i korozivne,
- Cjevovoda,
- Zavara.

Ploče su fleksibilne (mogu se omotati oko većine industrijskih geometrija), oštre (pružaju bolju rezoluciju od visoko- brzinskih filmova), efikasne (mogu se koristiti tisuće puta), prijenosne, dostupne u više dimenzijskih razreda te certificirane (prema EN 14784 i ASTM E 2446).

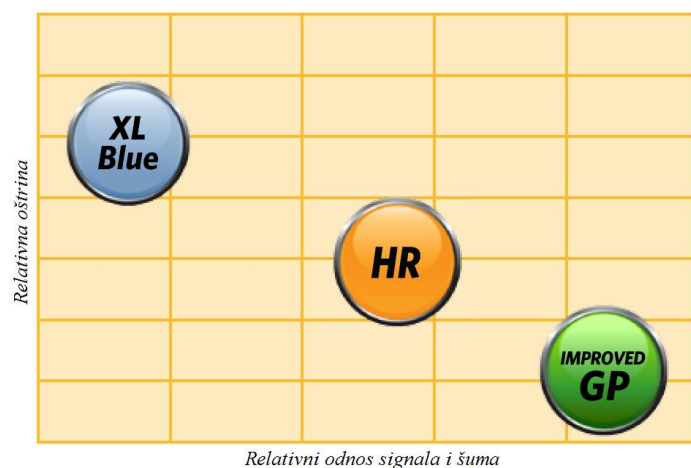
Životni vijek ploča primarno zavisi od pažljivog rukovanja i okolišnih uvjeta (gdje im nepažljivo rukovanje i prljava okolina mogu skratiti radni vijek). Ploče bi se trebale provjeriti svaki tjedan i zamijeniti pri pojavi oštećenja. Preporuča se čišćenje nakon svakih 200 snimanja ili svakih 30 dana. Rezanje ploča se nikako ne preporuča, jer će se time kompromitirati rubovi i ploče će postati izložene oštećenju zbog vlage [21].



Slika 40. Kodak Industrex slikovne ploče [22]

Ploče su predviđene za rad u temperaturnom rasponu od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ipak, rad pri nižim temperaturama (u trajanju od nekoliko sati) neće pretjerano utjecati na izvedbene performanse ili fizički integritet ploče. Pri povišenim se temperaturama ploča ne bi trebala savijati, zbog mogućnosti puknuća sloja fosfora [21].

Okvirni odabir odgovarajuće slikovne ploče može se izvesti, shodno potrebnim rezultatima, pomoću slike 41.



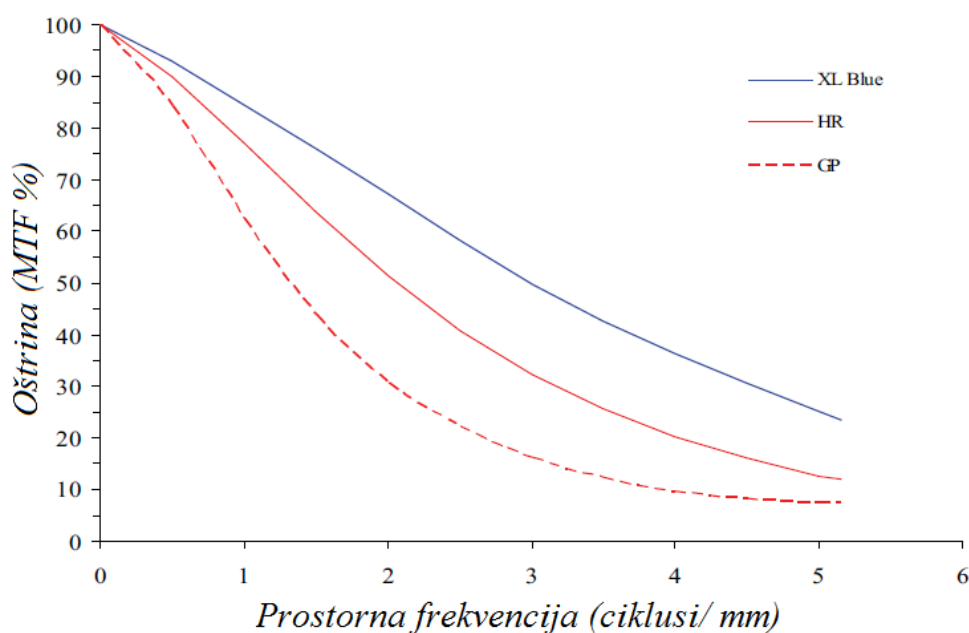
Slika 41. Okvirni odabir slikovne ploče [22]

Fosforni sloj ovih slikovnih ploča sastoji se od barijfluorobromjodida dopiranog dvovalentnim europijem i nanijetog na poliesternu potporu debljine 10 μm . Zaštitni polimerni sloj čuva ploče od tragova vlage ili otisaka prstiju. Potporni je sloj izrađen od polikarbonata [21]. Fizičke karakteristike (dimenzije) slojeva ovih slikovnih ploča dane su tablicom 4.

Tablica 4. Nominalna debljina slojeva Kodak Industrex slikovnih ploča [21]

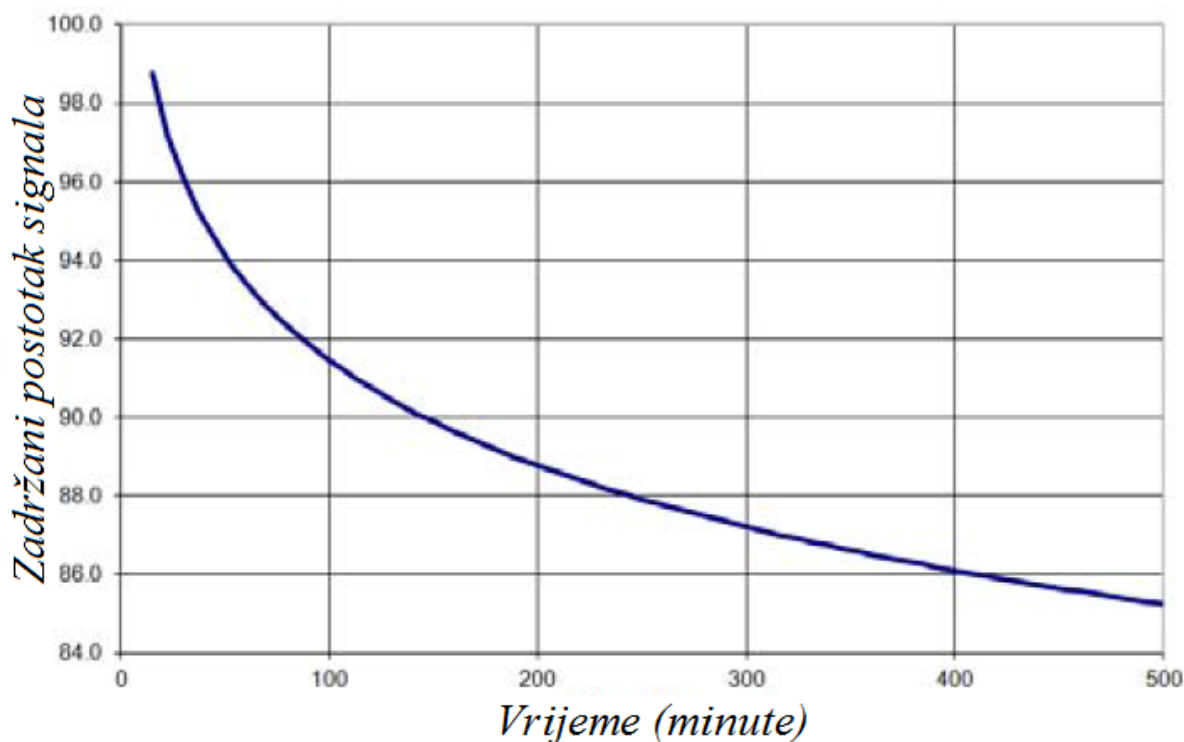
Vrsta ploče	Ukupna debljina, μm	Debljina sloja fosfora, μm	Debljina zaštitnog sloja, μm	Debljina potpornog sloja, μm
<i>XL</i>	436	160	4	254
<i>HR</i>	436	160	4	254
<i>GP</i>	584	290	11	254

Oštrinu slike ovih slikovnih ploča karakterizira modulacijska prijenosna funkcija (engl. *modulation transfer function*, MTF). Ona je mjera modulacije signala ili slike u odnosu na prostornu frekvenciju. Slika 42 prikazuje MTF krivulje Kodak Industrex slikovnih ploča (XL Blue davat će najveću oštrinu, HR nešto slabiju, a GP najmanju oštrinu slike) [21].



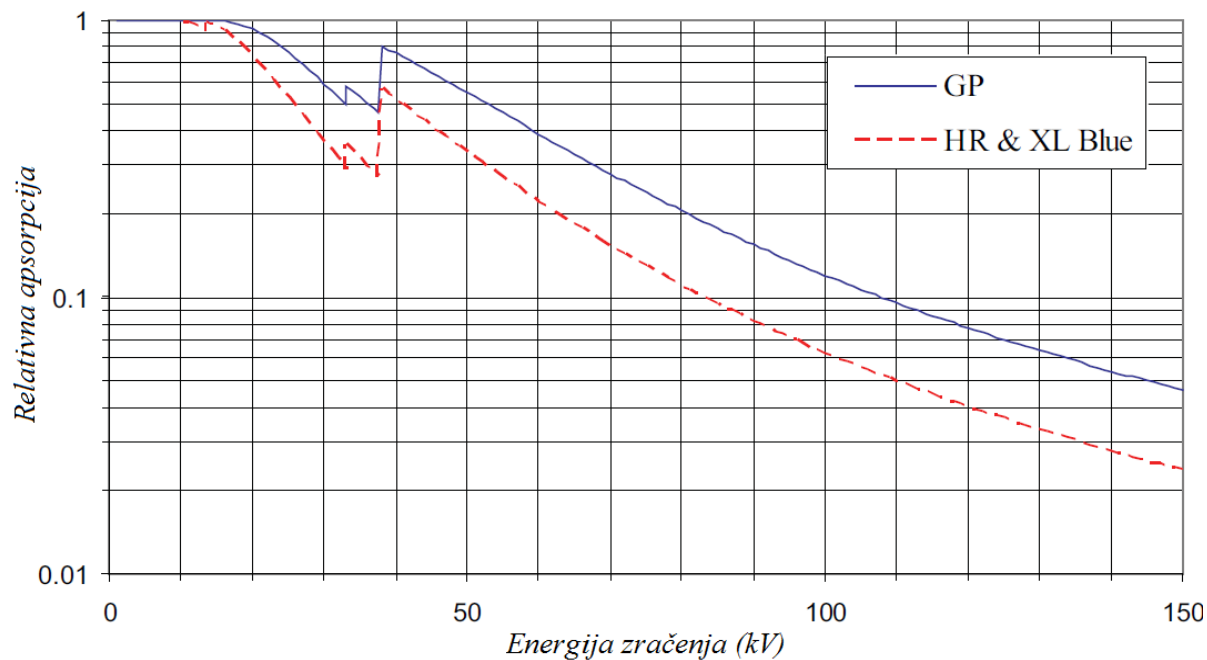
Slika 42. Usporedba oštrina Kodak Industrex slikovnih ploča [21]

Energija pohranjena u fosforni sloj slikovne ploče će s vremenom opadati, što rezultira gubitkom signala. Ova se pojava naziva slabljenje slike te je izraženija pri povišenim temperaturama. U većini slučajeva, slabljenje signala neće biti od velike važnosti. Ipak, kada se gubitak pohranjene energije pokaže kao problem, ploče se mogu izložiti većoj razini zračenja, čime će se kompenzirati slabljenje signala. Slika 43 prikazuje sposobnost Kodak Industrex slikovnih ploča da zadrže izvornu snimku (ne gube signal). Kako je iz slike vidljivo, i nakon 4 dana, Kodak Industrex ploče zadržavaju više od 75 % inicijalnog signala [21].



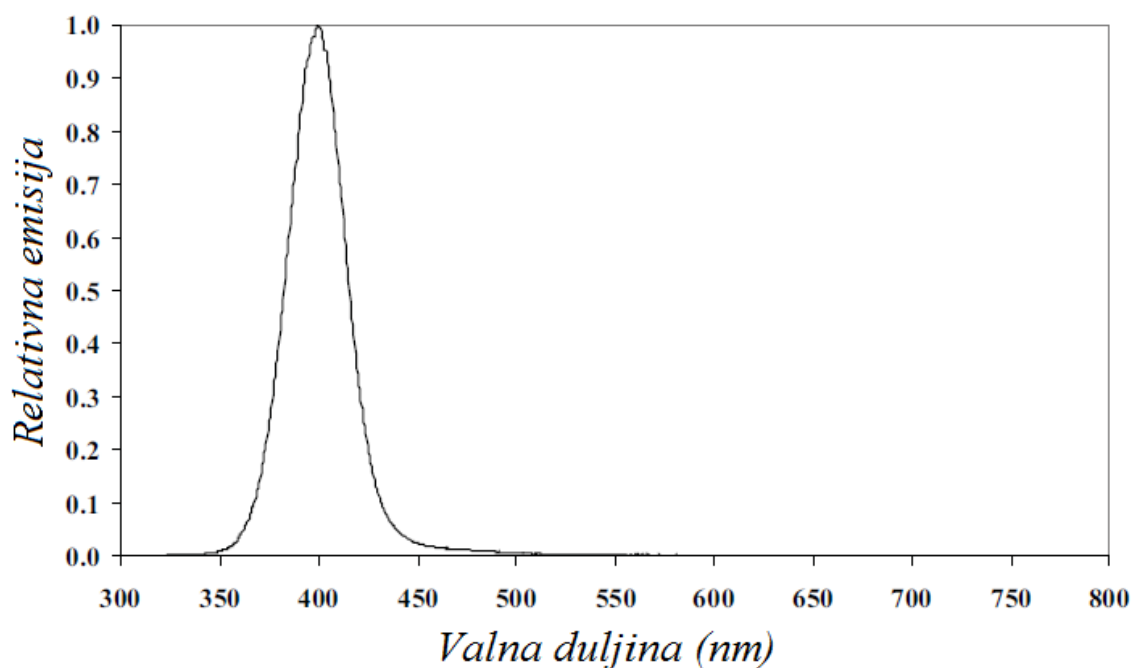
Slika 43. Sposobnost Kodak Industrex ploča da zadrže izvorni signal prema ASTM E2445 [21]

Kako sugerira slika 44, slikovne su ploče izuzetno osjetljive na nisko- energetske raspršenje. Iz toga se razloga, kako bi se raspršenje smanjilo i postigla optimalna kvaliteta slike, moraju koristiti olovne folije, pogotovo pri energijama većim od 100 kV. Debljina folija uglavnom je 2 do 3 puta veća od samoga filma [21].



Slika 44. Apsorpcija zračenja kod Kodak Industrex slikovnih ploča [21]

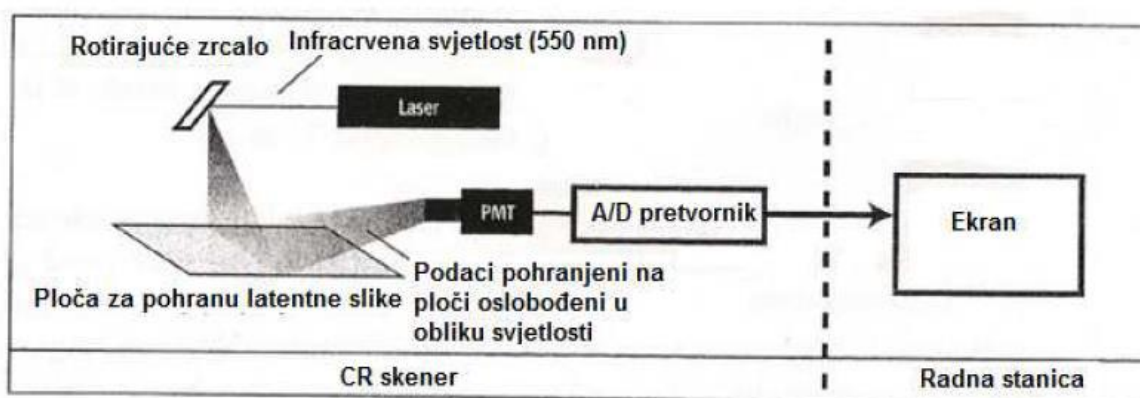
Kako je već ranije spomenuto, prilikom skeniranja slikovnih ploča laserom, ploče emitiraju svjetlost. Slika 45 prikazuje raspon valnih duljina (oko 400 nm) plave svjetlosti koja se emitira tom prilikom.



Slika 45. Emisija svjetlosti Kodak Industrex slikovnih ploča [21]

4.1.2. Laserski skener

Laserski skener je jedan od sastavnih dijelova sustava računalne radiografije. Njegova energija, kako je već opisano, služi za razvijanje dobivene latentne slike. Ona, naime, oslobađa zarobljene elektrone u fosfornome dijelu slikovne ploče te time uzrokuje nastanak (emisiju) vidljive svjetlosti. Svjetlost se detektira pomoću PMT cijevi (engl. *photo multiplier tube*) i, potom, konvertira u digitalni oblik (zapis), odnosno u nizove bitova koji čine digitalni zapis radiograma [18]. Slika 46 pojednostavljeno prikazuje osnovni princip rada laserskog uređaja, dok je slikom 47 prikazana jedna od mogućih praktičnih izvedbi laserskog CR skenera.



Slika 46. Osnovni princip rada laserskog uređaja [18]



Slika 47. Automatizirani CR skener [3]

5. PRAKTIČNI DIO

U sklopu praktičnog dijela ovoga rada, provedena su laboratorijska ispitivanja pomoću sustava za računalnu radiografiju u svrhu određivanja utjecaja olovnih folija na kvalitetu digitalnog radiografskog zapisa variranjem debljine olovnih folija i vrste slikovne ploče pri različitim energijama zračenja. Na dobivenim radiografskim zapisima kvantificiran je utjecaj olovnih folija mjerenjem kvantitativnih pokazatelja kvalitete radiografskog zapisa (intenzitet piksela, odnos signal/ šum). Cilj eksperimenta bio je odrediti optimalne kombinacije sustava „slikovna ploča- energija zračenja- debljina olovne folije“. Eksperiment je izveden u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

U narednim su točkama opisani eksperimentalni postav i postupak analize radiograma te su predstavljeni i analizirani dobiveni rezultati ispitivanja.

5.1. Eksperimentalni postav

Kao izvor zračenja, korištena je rendgenska cijev pri različitim naponima (150, 175, 200, 250 i 300 kV), postavljena na visinu od 1 000 mm udaljenosti od ispitivanog uzorka. Korištene su tri različite slikovne ploče marke Kodak Industrex: XL Blue, HR i GP. Također, korištene su dvije folije različitih debljina: 0,02 mm i 0,2 mm (prikazane na slici 48).



Slika 48. Korištene folije (tanja folija je lijevo, a deblja desno)

Kao indikator kvalitete radiografske snimke korišten je duplex indikator (EN- 462- 5).

Duplex indikator se sastoji od 13 parova žica (načinjene od materijala visoke gustoće, uobičajeno volfram i platina) gdje je svaki par žica promjera d međusobno razmaknut za veličinu tog istog promjera. Prvi je par žica promjera 0,8 mm, dok je zadnji par žica promjera 0,05 mm (parovi žica i korespondirajuća prostorna rezolucija dani su tablicom 5). Žice su smještene u proziran, otporan i dimenzijski stabilan plastični materijal.

Kada se spomenuti parovi žica promatraju, uoči se par kod kojeg se dvije žice više ne mogu vizualno razlučiti jedna od druge. Promjer d toga para predstavlja mjeru oštine radiografske snimke, kako je detaljnije opisano u narednim točkama [23], [24]. Slika 49 prikazuje duplex indikator.

Tablica 5. Prostorna razlučivost kod pojedinih elemenata duplex indikatora [24]

Element	Prostorna razlučivost, mm
1	0,800
2	0,630
3	0,500
4	0,400
5	0,320
6	0,250
7	0,200
8	0,160
9	0,130
10	0,100
11	0,080
12	0,063
13	0,050



Slika 49. Duplex indikator [24]

Detalj postava eksperimenta sa korištenim indikatorom prikazan je slikom 50.



Slika 50. Korišteni indikator

Obje su folije postavljene na slikovnu ploču. Folije nisu postavljene jedna do druge, već je među njima ostavljen prostor bez folija. Na folije je smještena čelična ploča debljine 10 mm. Duplex indikator postavljen je na čeličnu ploču.

U sklopu eksperimenta, energije zračenja, ploče, folije i indikator su kombinirani i varirani na takav način da su ispitane sve moguće kombinacije istih. Ovo ilustrira tablica 6, koja konceptualno prikazuje plan izvođenja pokusa (snimanja radiografskih zapisa).

Tablica 6. Plan izvođenja pokusa

Ploča	Napon rendgenske cijevi, kV	Indikator na foliji debljine		
		0 mm	0,02 mm	0,2 mm
XL Blue	150	1	2	3
	175	4	5	6
	200	7	8	9
	250	10	11	12
	300	13	14	15
HR	150	16	17	18
	175	19	20	21
	200	22	23	24
	250	25	26	27
	300	28	29	30
GP	150	31	32	33
	175	34	35	36
	200	37	38	39
	250	40	41	42
	300	43	44	45

Fizički postav pokusa prikazan je slikom 51.



Slika 51. Fizički postav pokusa

Skeniranje slikovnih ploča obavljeno je skenerom VMI 5100MS (slika 52), čije su karakteristike dane tablicom 7.



Slika 52. Skener VMI 5100MS

Tablica 7. Karakteristike skenera VMI 5100MS [26]

Izvor svjetlosti	Laser dioda/ fotomultiplikator
Dubina piksela	65 000/ 16 bitna datoteka
Veličina laserskog snopa	50 μm do 200 μm (koraci od 10 μm)
Efikasnost	Preko 60 slika na sat
Transportni mehanizam	Jednostruki
Skeniranje/ brisanje	Automatsko, u jednom prolazu, ravno
Operacijski sustav	Windows XP Professional
Napajanje	100 V do 240 V 2,5 A 47 Hz do 63 Hz
Mreža	DICOM/ DICONDE
Masa	31,75 kg
Vrsta	Stolni

Postavke skenera bile su:

- Rezolucija: 50 μm ,
- Napon fotomultiplikatora: 5,25 mV,
- Specifična energija lasera: 15 J/ m^2 .

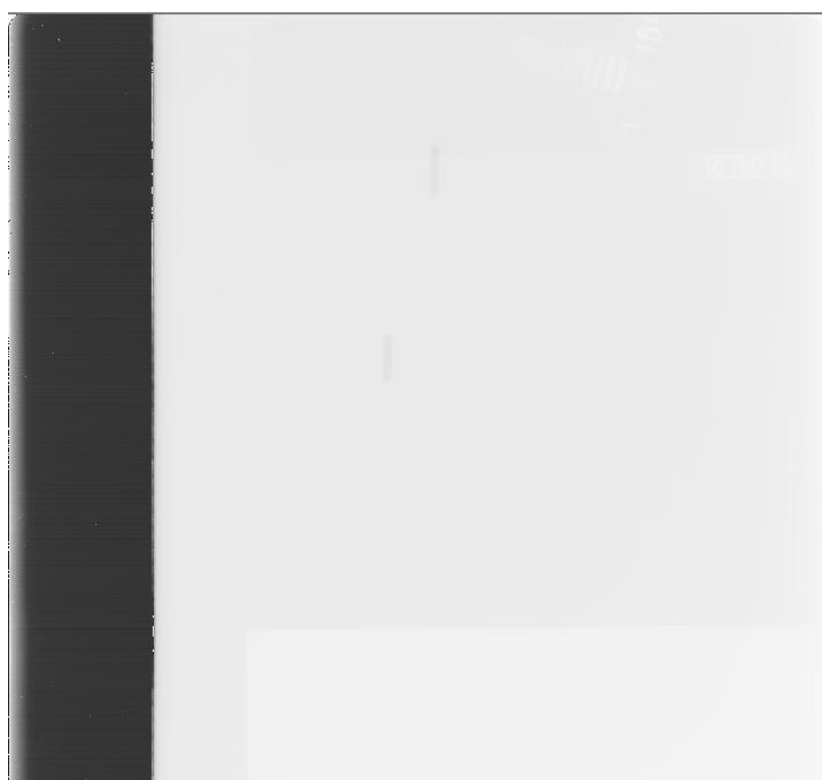
5.2. Analiza radiograma

Za analizu radiograma korišten je specijalizirani *software StarrPlot* (verzija 1.8., 2011. godina) proizvođača Virtual Media Integration Ltd.

Snimci su, prema uputama proizvođača skenera, prvo linearizirani i invertirani. Slike 53 i 54 daju vizualnu razliku između neobrađene i obrađene radiografske slike.

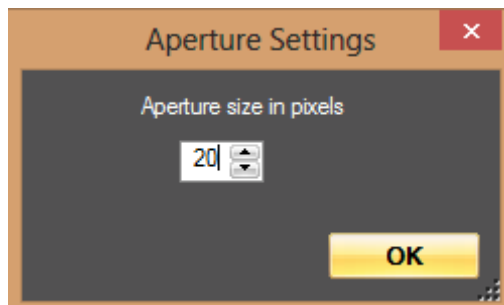


Slika 53. Slika prije linearizacije i invertiranja



Slika 54. Slika nakon linearizacije i invertiranja

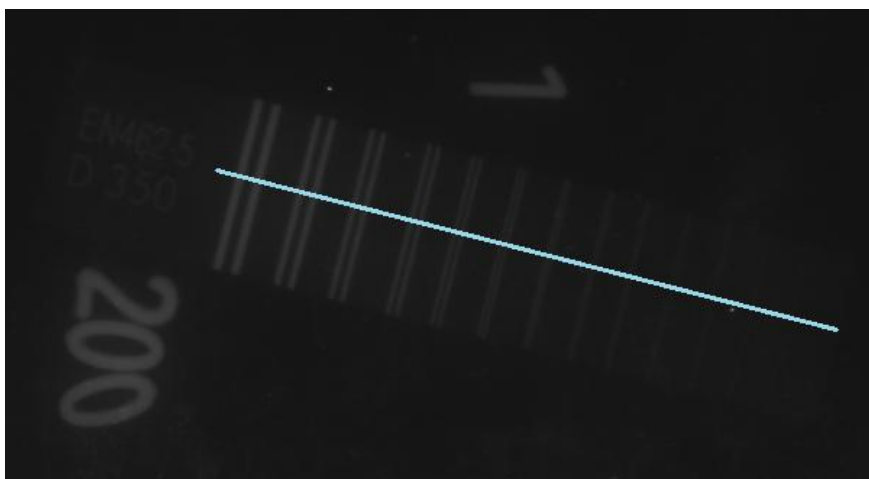
Nakon dodatnog postavljanja postavki programa prema naputcima proizvođača (slika 55), pristupilo se daljnjim koracima analize radiograma- određivanju prostorne razlučivosti, određivanju utjecaja folije na intenzitet snimke, određivanju odnosa signal- šum te određivanju kvalitete radiografske snimke pomoću žičanog indikatora.



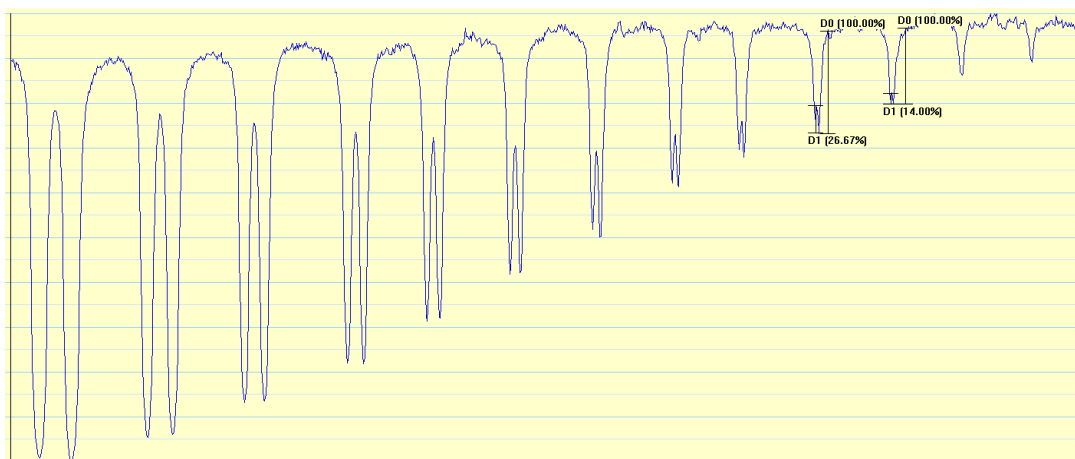
Slika 55. Podešavanje postavki prema naputcima proizvođača

5.2.1. Određivanje prostorne razlučivosti

Određivanje prostorne razlučivosti vrši se pomoću *Dual Value Graph* alata. Ravna linija prevuče se preko duplex indikatora (slika 56) te se, u dobivenom grafu, traži granična vrijednost utora koji označava razmak između dvije žice indikatora. Kada se pronade element čiji je *dip* manji od 20 % (slika 57), provjerava se slijedom o kojem se rednom elementu indikatora radi te se njegova odgovarajuća prostorna rezolucija iščitava iz tablice duplex indikatora (slika 58).



Slika 56. Određivanje prostorne razlučivosti



Slika 57. Jedanaesti element Duplex indikatora pokazuje *dip* manji od 20 %

TABLE 1 Element Number, Corresponding Unsharpness and Wire Diameter^A

	Element Number	Corresponding Unsharpness (mm)	Wire Diameter and Spacing, d (mm)	Tolerance of Wire Diameter and Wire Spacing (mm)
Pt ^B	13	0.10	0.05	±0.005
Pt	12	0.13	0.063	
Pt	11	0.16	0.08	
Pt	10	0.20	0.10	
Pt	9	0.26	0.13	
Pt	8	0.32	0.16	±0.01
Pt	7	0.40	0.20	
Pt	6	0.50	0.25	
Pt	5	0.64	0.32	
Pt	4	0.80	0.40	
W ^C	3	1.00	0.50	±0.02
W	2	1.26	0.63	
W	1	1.60	0.80	

^A This table is based on data provided in EN-462-5:1994.

^B Pt = Platinum.

^C W = Tungsten.

Slika 58. Očitanje prostorne razlučivosti

Vrijednosti očitane u tablici sa slike 58 naknadno se upisuju u StarrPlot *software* kako bi podatci dobiveni u narednim koracima bili što točniji.

5.2.2. Određivanje utjecaja folije na intenzitet snimke

Za usporedbu intenziteta snimke dobivene uz korištenje folije i bez nje, upotrijebljen je alat *ROI stats* (20x55 pikesla). Pri tome se, podešavajući kontrast slike, pazilo da se izbjegnu nesavršenosti snimke, kako bi imale što manji utjecaj na konačni rezultat. Ilustracija tako dobivenih podataka dana je slikom 59. Usporedba je izražena omjerom intenziteta dobivenog korištenjem folije (I_f) i intenziteta bez folije (I_0).

```
-- Using Square Aperture Method (88.6µm for reference rather than 100µm)
```

	Mean	d psl	d psl corr	SR	d psl_100	SNR
Sample 1:	5931.0500	026.8542	027.3349	63.0	19.4368	305.1460
Sample 2:	6000.2000	026.3948	026.3942	63.0	18.7679	319.7061
Sample 3:	5975.0500	025.6082	026.0666	63.0	18.5349	322.3672
Sample 4:	6066.2000	023.3515	023.2621	63.0	16.5408	366.7415
Sample 5:	5989.0000	026.8808	026.1995	63.0	18.6294	321.4805

Slika 59. Ilustrativni prikaz podataka dobivenih korištenjem *ROI Stats* postavke

5.2.3. Određivanje odnosa signal- šum

Za određivanje odnosa signal- šum (*SNR*) korišteni su isti numerički setovi podataka kao i za prethodno ispitivanje. Odnos signal- šum kvantificiran je pojmom normaliziranog *SNR*- a. Normalizirani *SNR* (SNR_N) jest *SNR* normaliziran po prostornoj razlučivosti SR_b , kako i sugerira izraz (9). *StarrPlot software*, kao rezultat ispitivanja, odmah pruža informaciju o SNR_N - u.

$$SNR_N = SNR_{izmjereno} \frac{88,6 \mu m}{SR_b} \quad (9)$$

5.3. Rezultati mjerenja

Dobiveni rezultati mjerenja u ovom su poglavlju prikazani tablično, prvo za XL Blue (tablice 8 i 9), a zatim i HR (tablice 10 i 11) te GP slikovnu ploču (tablice 12 i 13). Za svaku su ploču dane dvije tablice- prva koja prikazuje izmjerene intenzitete te druga koja nudi izmjerene SNR_N vrijednosti.

Tablica 8. Rezultati mjerenja- XL Blue ploča, I_f / I_0

Napon rendgenske cijevi, kV	Debljina folije, mm	Intenzitet			Prosječni intenzitet I_f	I_f / I_0
		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3		
150	0	5320,2500	5401,2500	5049,2000	5256,9000	1,0000
	0,02	5768,0500	5575,2500	5282,5000	5541,9333	1,0542
	0,2	3299,1500	3307,2000	3289,7500	3298,7000	0,6275
175	0	5879,4500	5703,7000	5222,2500	5601,8000	1,0000
	0,02	6346,0500	5836,2500	5672,6500	5951,6500	1,0625
	0,2	3900,9000	3816,0500	3558,2500	3758,4000	0,6709
200	0	6877,1000	6904,8500	6725,0500	6835,6667	1,0000
	0,02	7307,8000	7293,0500	7258,9000	7286,5833	1,0660
	0,2	4989,3500	4817,6500	4596,8500	4801,2833	0,7024
250	0	6168,3500	7065,3500	6998,3000	6744,0000	1,0000
	0,02	7160,4500	8109,6500	7929,6500	7733,2500	1,1467
	0,2	4665,9500	5325,1000	5342,2500	5111,1000	0,7579
300	0	6969,6500	5996,2000	5157,3500	6041,0667	1,0000
	0,02	8456,7500	7077,6000	6072,8500	7202,4000	1,1931
	0,2	5630,4500	4949,5000	4266,8500	4948,9333	0,8192

Tablica 9. Rezultati mjerenja- XL Blue ploča, SNR_N

Napon rendgenske cijevi, kV	Debljina folije, mm	SNR_N			Prosječni SNR_N
		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	
150	0	1133,3729	1140,3797	1114,6145	1129,4557
	0,02	955,2587	900,9919	1033,9477	963,3994
	0,2	974,3755	1015,3214	995,1174	994,9381
175	0	911,3700	893,7500	903,1709	902,7636
	0,02	828,5898	871,3792	839,4909	846,4866
	0,2	845,4362	842,4438	852,1787	846,6862
200	0	908,6965	972,9903	977,7188	953,1352
	0,02	801,3217	846,4699	839,7696	829,1871
	0,2	829,2931	858,4289	872,0374	853,2531
250	0	1069,7054	1111,6420	1074,4796	1085,2757
	0,02	811,5236	788,7989	767,2305	789,1843
	0,2	787,7743	876,0862	802,0608	821,9738
300	0	1089,7375	1043,9260	1085,8353	1073,1663
	0,02	777,9170	870,0545	859,9917	835,9877
	0,2	636,8044	666,2345	623,7944	642,2778

Tablica 10. Rezultati mjerenja- GP ploča, I_f/I_0

Napon rendgenske cijevi, kV	Debljina folije, mm	Intenzitet			Prosječni intenzitet I_f	I_f/I_0
		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3		
150	0	27848,1500	27372,8000	28252,5000	27824,4833	1,0000
	0,02	26220,6500	26707,2000	26366,6000	26431,4833	0,9499
	0,2	11988,4000	12406,6000	12138,2000	12177,7333	0,4377
175	0	28609,2500	28571,8000	29003,5500	28728,2000	1,0000
	0,02	27830,9500	27936,7500	27212,1500	27659,9500	0,9628
	0,2	13970,4500	13649,3500	13735,5500	13785,1167	0,4798
200	0	32039,5500	32627,1000	32515,9500	32394,2000	1,0000
	0,02	31325,4500	32124,8000	31989,7500	31813,3333	0,9821
	0,2	17440,8000	18231,5500	17410,4500	17694,2667	0,5462
250	0	32457,8500	33570,2000	34036,7000	33354,9167	1,0000
	0,02	32941,7000	33778,0500	34648,0500	33789,2667	1,0130
	0,2	19247,0500	19566,2500	19233,0500	19348,7833	0,5801
300	0	32510,7000	32806,3500	31392,7000	32236,5833	1,0000
	0,02	32693,2000	33320,8000	32896,1500	32970,0500	1,0228
	0,2	21742,5500	21704,2500	21422,0000	21622,9333	0,6708

Tablica 11. Rezultati mjerenja- GP ploča, SNR_N

Napon rendgenske cijevi, kV	Debljina folije, mm	SNR_N			Prosječni SNR_N
		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	
150	0	782,3979	729,4242	782,2887	764,7036
	0,02	564,5051	598,5178	576,5685	579,8638
	0,2	594,4814	610,9664	570,4969	591,9816
175	0	507,6365	521,9389	577,6444	535,7399
	0,02	594,5919	593,4633	580,7680	589,6077
	0,2	446,3408	433,0464	455,9478	445,1117
200	0	593,5409	546,6291	599,5408	579,9036
	0,02	625,7299	598,9360	541,3945	588,6868
	0,2	566,7061	567,5582	560,2128	564,8257
250	0	520,7666	543,8073	516,5797	527,0512
	0,02	581,4194	530,4072	554,4020	555,4095
	0,2	588,3541	589,0967	607,3394	594,9301
300	0	591,4763	593,1975	555,0520	579,9086
	0,02	439,5862	454,6603	474,5968	456,2811
	0,2	464,3200	466,5931	471,1087	467,3406

Tablica 12. Rezultati mjerenja- HR ploča, I_f/I_0

Napon rendgenske cijevi, kV	Debljina folije, mm	Intenzitet			Prosječni intenzitet I_f	I_f/I_0
		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3		
150	0	22542,9500	22262,8500	22455,2000	22420,3333	1,0000
	0,02	21998,4500	22117,9000	21797,9500	21971,4333	0,9800
	0,2	10799,6500	10726,7500	10490,1500	10672,1833	0,4760
175	0	24109,1500	23297,9500	23143,3000	23516,8000	1,0000
	0,02	24455,8000	24192,7500	24009,8000	24219,4500	1,0299
	0,2	13121,3000	13115,6500	12705,8000	12980,9167	0,5520
200	0	26547,3000	26529,8000	26452,5000	26509,8666	1,0000
	0,02	27547,0500	27870,1000	27823,5500	27746,9000	1,0467
	0,2	16123,3500	15155,2000	16380,6000	15886,3833	0,5993
250	0	29850,6500	29235,4500	28341,2500	29142,4500	1,0000
	0,02	31067,2000	31530,6500	30631,4500	31076,4333	1,0664
	0,2	21014,3000	19883,8500	19697,1500	20198,4333	0,6931
300	0	27191,8000	27175,0500	27318,2400	27228,3633	1,0000
	0,02	30243,4000	28762,3000	30057,6933	29687,7978	1,0903
	0,2	20704,4000	21187,6000	20618,3030	20836,7677	0,7653

Tablica 13. Rezultati mjerenja- HR ploča, SNR_N

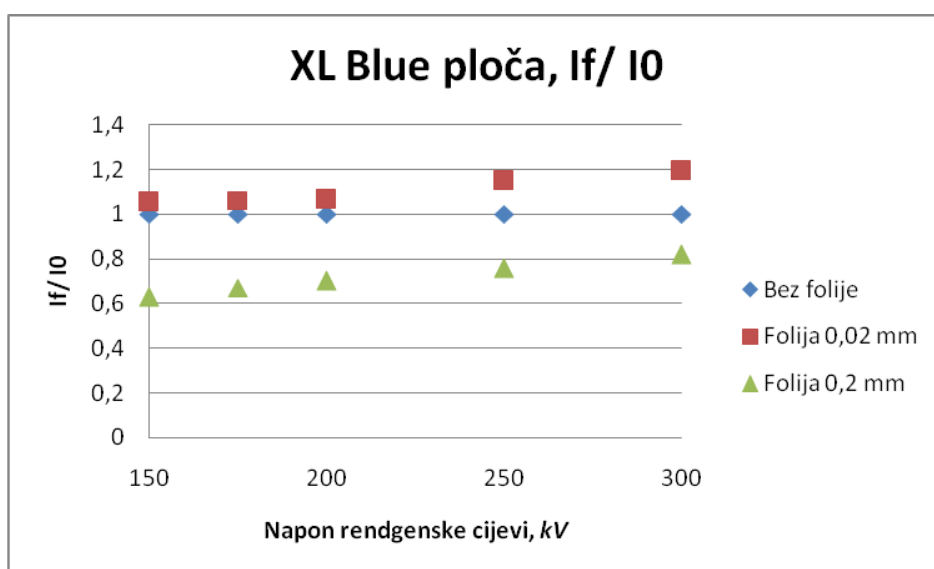
Napon rendgenske cijevi, kV	Debljina folije, mm	SNR_N			Prosječni SNR_N
		Mjerenje 1	Mjerenje 2	Mjerenje 3	
150	0	914,1145	969,0111	951,2382	944,7879
	0,02	733,7893	751,4446	760,9650	748,7330
	0,2	512,1208	532,3200	544,1859	529,5423
175	0	657,5639	614,8793	709,6319	660,6917
	0,02	558,2854	588,9471	567,4045	571,5457
	0,2	520,9903	494,5645	504,5280	506,6943
200	0	876,0246	887,2574	866,9835	876,7552
	0,02	815,2634	805,5404	830,9892	817,2643
	0,2	650,4802	704,1600	675,1055	676,5819
250	0	928,1785	930,2612	988,9371	949,1256
	0,02	810,9918	831,3132	765,6894	802,6648
	0,2	680,8876	602,5850	641,3938	641,6221
300	0	764,6314	756,9849	754,0046	758,5403
	0,02	735,2956	769,0675	828,3460	777,5697
	0,2	752,1300	803,4883	770,9100	775,5094

5.4. Analiza rezultata mjerenja

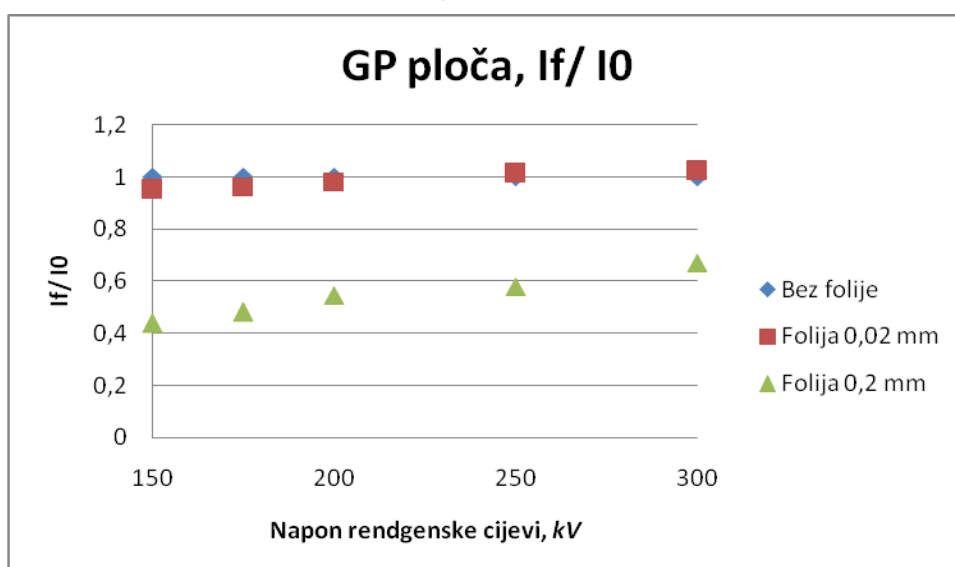
U ovoj će točki rezultati dobiveni mjerenjima biti grafički interpretirani te detaljnije analizirani.

5.4.1. Utjecaj folije na intenzitet snimke

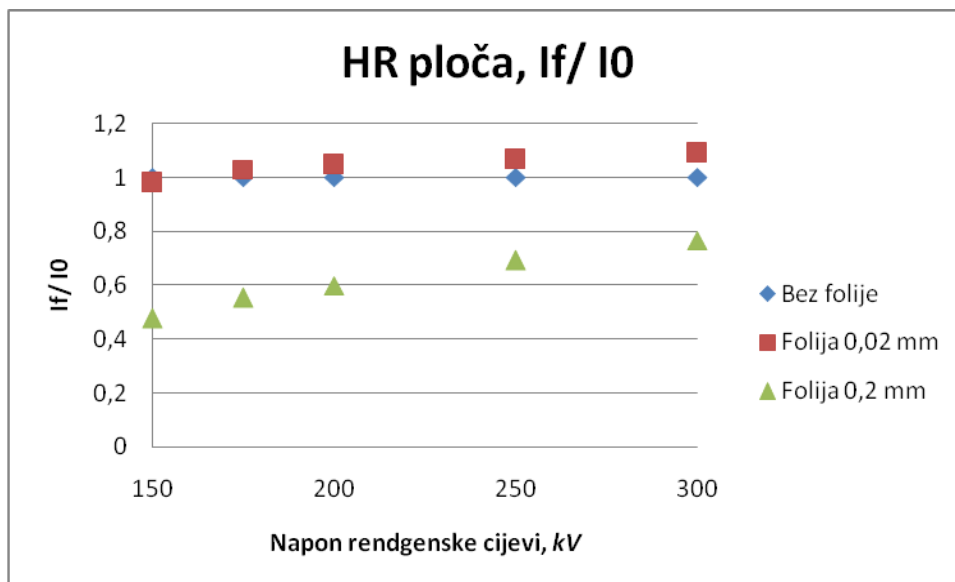
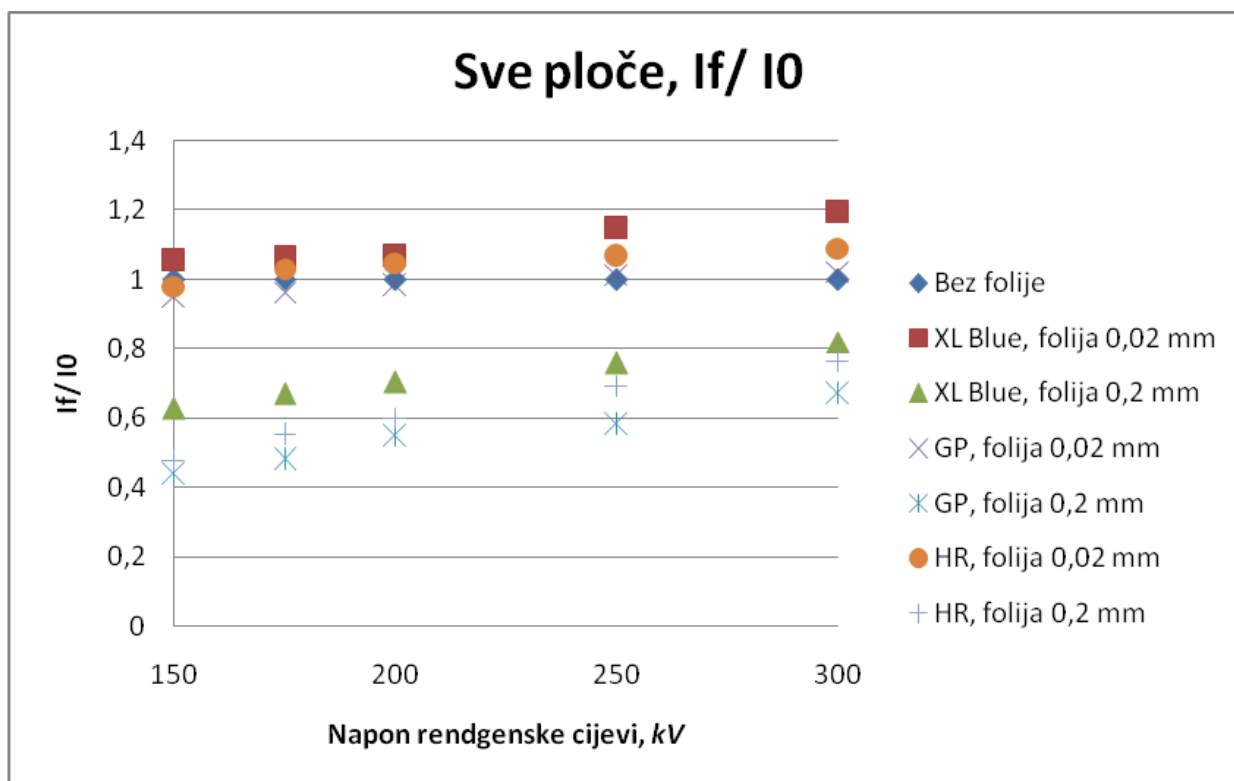
Utjecaj folije na intenzitet snimke kvantificiran je odnosom I_f/I_0 . Slikom 60 taj je odnos prikazan za XL Blue slikovnu ploču, slikom 61 za GP ploču i slikom 62 za HR ploču. Na kraju, slika 63 prikazuje skupne I_f/I_0 odnose svih korištenih ploča, folija i energija.



Slika 60. I_f/I_0 - XL Blue ploča



Slika 61. I_f/I_0 - GP ploča

Slika 62. I_f/I_0 - HR pločaSlika 63. I_f/I_0 - sve ploče

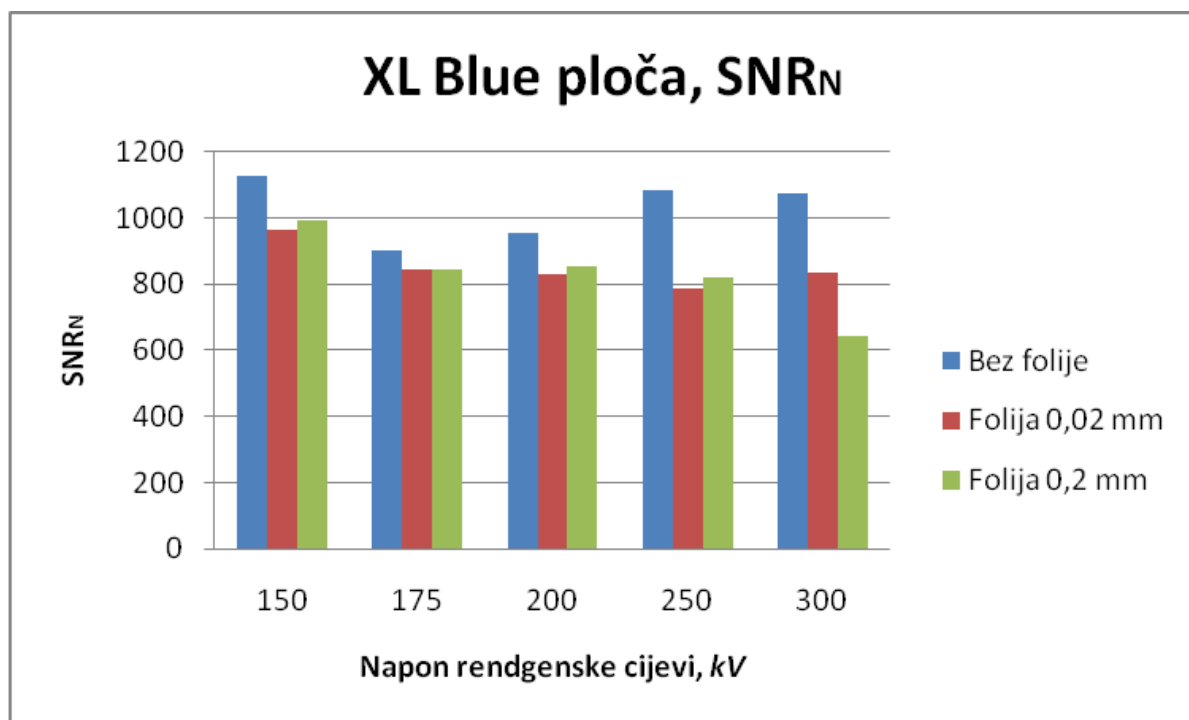
Iz slike 63, vidljivo je da je najviše I_f/I_0 odnose, pri svim razinama energije, postigla XL Blue slikovna ploča, uz foliju debljine 0,02 mm. Na odnos, očito je, najveći utjecaj ima debljina folije, jer tanje folije bez iznimke daju veći I_f/I_0 odnos od debljih.

Zanimljivo je primijetiti kako kretanje I_f/I_0 odnosa nije linearnog karaktera. Naime, pri nižim razinama energije promjena odnosa je brza, da bi se, došavši do viših razina energije, brzina promjene postepeno usporavala i, na kraju, počela stagnirati. Ovaj bi efekt, uz više mjerenja (finiji rezultati) i korištenje još viših energija, bio i izraženiji.

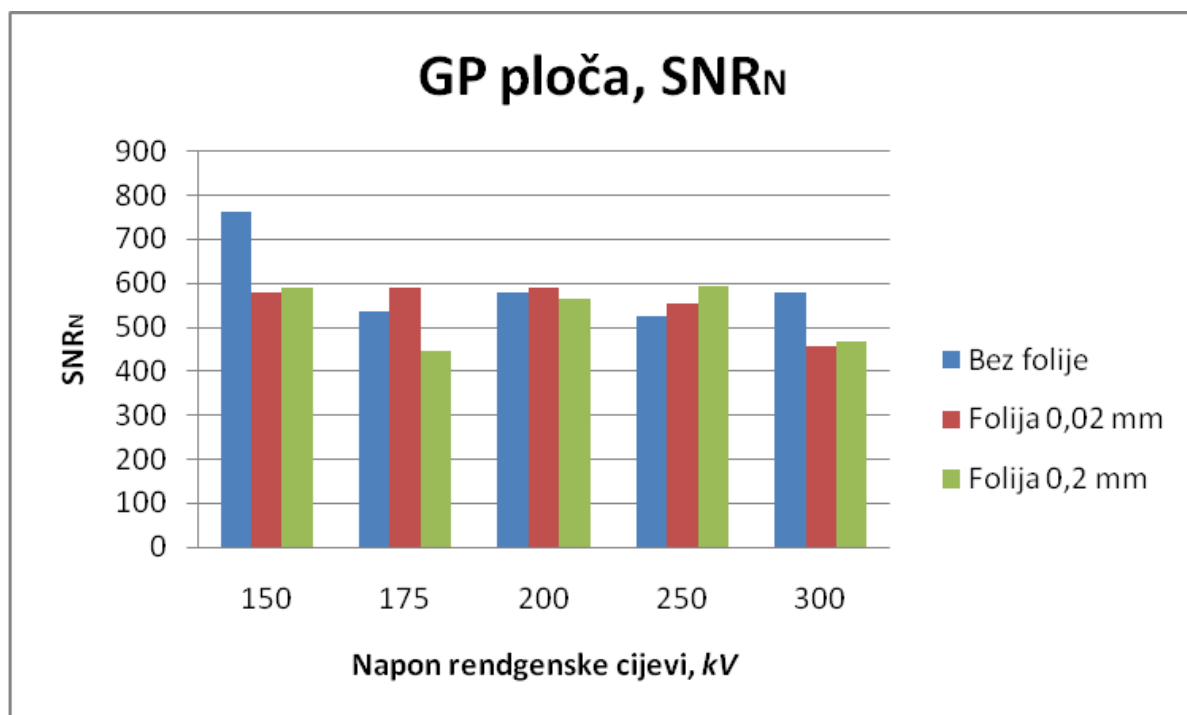
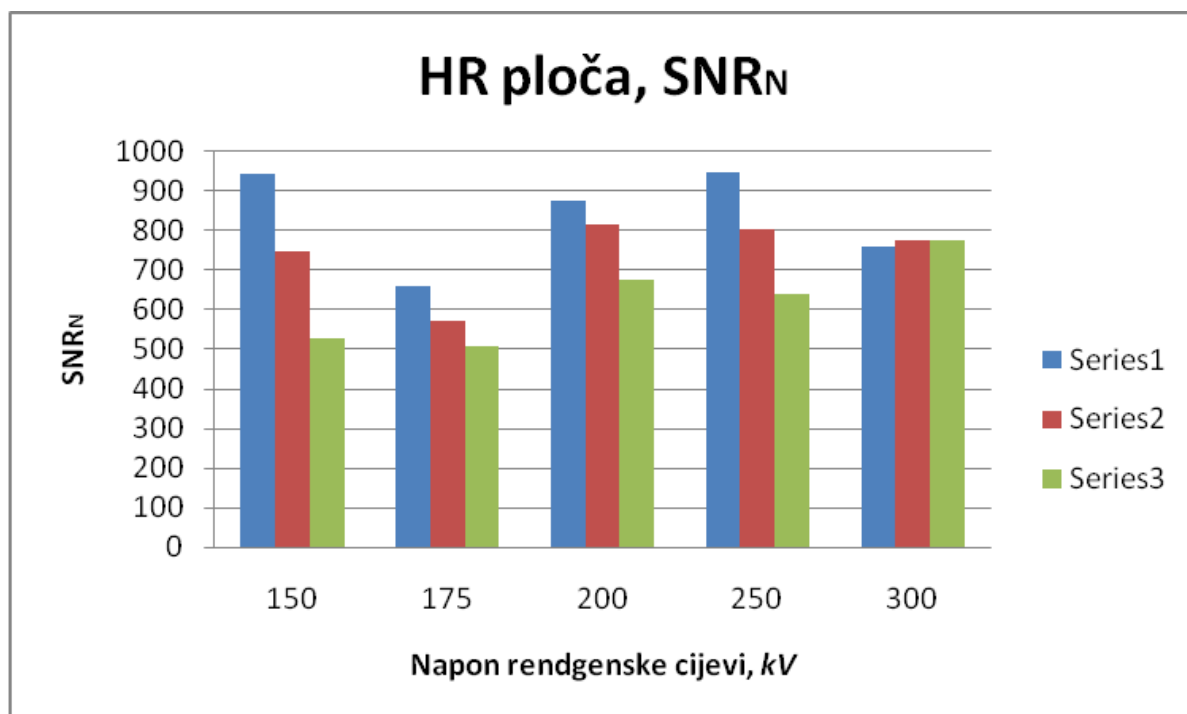
Isto tako, mora se postaviti pitanje isplativosti korištenja olovnih folija pri nižim energijama. Naime, kako se i vidi iz rezultata, pri manjim je energijama zračenja utjecaj folija nezadovoljavajući. Također, primjetno je da korištenje debljih olovnih folija kao prednjih folija ni na koji način ne pridonosi kvaliteti radiografske snimke. Ipak, deblje se folije i dalje mogu koristiti kao stražnje folije.

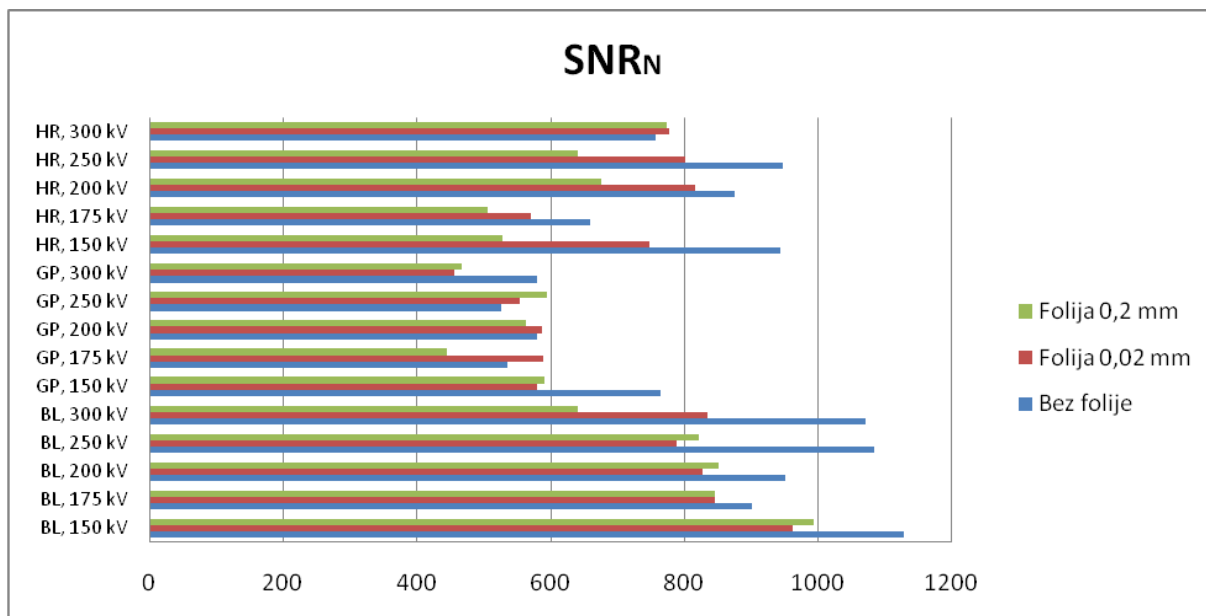
5.4.2. Odnos signal- šum

Slike 64, 65 i 66 daju SNR_N vrijednosti za, redom, XL Blue, GP i HR slikovnu ploču, dok slika 67 sumarno prikazuje SNR_N vrijednosti svih slikovnih ploča zajedno.



Slika 64. SNR_N - XL Blue ploča

Slika 65. SNR_N - GP pločaSlika 66. SNR_N - HR ploča

Slika 67. SNR_N - sve ploče

Vidljivo je da uvjerljivo najveću SNR_N vrijednost daje XL Blue slikovna ploča, pri 150 kV, bez korištenja folije. Globalno gledano, upotreba folije ovdje je dominantni utjecaj te se, načelno, najbolji rezultati postižu bez korištenja folije (iznimka su GP ploča pri srednjim razinama energije i HR ploča pri 300 kV).

Valja imati na umu da SNR_N vrijednost može biti varljiva; visoki odnos signala i šuma jest dobro svojstvo, ali u sebi svejedno može kriti veliku količinu šuma.

6. ZAKLJUČAK

Računalna radiografija je metoda nerazornog ispitivanja koja kao senzor ionizirajućeg zračenja koristi fosforne slikovne ploče. Kod njih, različita konstrukcija i specifični odaziv na ionizirajuće zračenje uzrokuju promjenu u pojačivačkom efektu olovnih folija, tj. poboljšanju kvalitete radiografske slike koja je prisutna prilikom upotrebe olovnih folija u kombinaciji s radiografskim filmom kod klasične industrijske radiografije.

U ovom je radu, kroz eksperimentalna laboratorijska ispitivanja, istražen utjecaj olovnih folija na kvalitetu digitalne radiografske slike dobivene na tri vrste slikovnih ploča pri različitim energijama zračenja.

Analizom dobivenih rezultata moguće je zaključiti sljedeće:

- Pojačivački efekt olovnih folija izraženiji je prilikom snimanja na slikovne ploče sa tanjim zaštitnim slojem (XL Blue i HR), neovisno o energiji zračenja,
- Pojačivački efekt prisutan je na energijama x- zračenja višim od 175 keV i kod upotrebe tanje folije (0,02 mm),
- Pojačivački efekt nije zadovoljavajući pri upotrebi deblje folije (0,2 mm) niti na jednoj razini energije zračenja,
- Upotreba olovnih folija negativno je utjecala na analizirani pokazatelj kvalitete digitalnog radiografskog zapisa, SNR_N , osim kod GP slikovne ploče pri razinama energije od 175, 200 i 250 kV te kod HR slikovne ploče pri 300 kV,

Sve spomenuto navodi na zaključak kako, unatoč prisutnome pojačivačkom efektu kod kombinacije XL Blue ili HR slikovne ploče i tanke olovne folije pri energijama zračenja višim od 175 kV, uslijed povećanja šuma i ukupnog smanjenja SNR_N -a, kod industrijske računalne radiografije čeličnih ispitnih objekata debljine do 10 mm nije preporučljivo koristiti prednje olovne folije.

LITERATURA

- [1] Bošković, S.: „Kvantifikacija osjetljivosti računalne radiografije višedjelnih komponenti“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [2] Mix, P. E.: „Introduction to nondestructive testing, a training guide“, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, SAD, 2005.
- [3] General Electric Company: „Industrial Radiography- Image forming techniques“, GE Inspection Technologies, 2007.
- [4] Eastman Kodak Company: „Radiography in Modern Industry“, New York, SAD, 1980.
- [5] Desnica, V.: „Instrumentalna analiza“, Odsjek za restauriranje i konzerviranje umjetnina, Akademija likovnih umjetnosti, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [6] Janković, S., Eterović, D.: „Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike“, Medicinska naklada, Zagreb, 2002.
- [7] Faj, D.: „Uvod u zaštitu od ionizirajućeg zračenja“, Medicinski fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2014.
- [8] Sa interneta:
<http://whs.wsd.wednet.edu/faculty/busse/mathhomepage/busseclasses/radiationphysics/lecturenotes/chapter7/chapter7.html>, pristupljeno 27. veljače 2014.
- [9] Hellier, C. J.: „Handbook of Nondestructive Evaluation“, The McGraw- Hill Companies, Inc., 2003.
- [10] NDT Resource Center, sa interneta: <http://www.ndt-ed.org>, pristupljeno 1. ožujka 2014.
- [11] Kheruka, S. C., Naithani, U. C., Maurya, A. K., Painuly, N. K., Aggarwal, L. M., Gambhir, S.: „A study to improve the image quality on low- dose computed tomography (SPECT) using filtration“, *Indian Journal of Nuclear Medicine*, vol. 26, br. 1, 14- 21, 2011.
- [12] Carestream Health, Inc.: „Kodak Industrex High Speed HS800 Film“, *Technical data/ Non- destructive testing*, TI- 2637, New York, SAD, 2012.

- [13] Mladenović, I.: „X- zrake u umjetnosti“, sa interneta: <http://www.fsb.unizg.hr/ndt/stud/radovi/X-rayArt/X-rayArt.html>, pristupljeno 2. ožujka 2014.
- [14] Hodžić, E.: „Radiografska ispitivanja“, Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici, Zenica, BiH, 2012.
- [15] Sa interneta: <http://www.radcal.com/301-densitometer-detail>, pristupljeno 25. studenog 2014.
- [16] Mihanović, F., Matijević, J., Baćak, J.: „Slika Sv. Obitelj sa sv. Ivanom iz samostana sv. Frane u Splitu- istraživanje i konzervacija“, *Baština*, br. 35, 189- 202, Split, 2009.
- [17] Miletić, D.: „Slikovne dijagnostičke pretrage“, Medicinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2009.
- [18] Hižman, B.: „Procjena stanjenja stjenke pomoću računalne radiografije“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2013.
- [19] Miletić, D.: „Digitalni zapis u radiologiji“, Medicinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2009.
- [20] Omelić, M.: „Computed Radiography“, *NDT Days 2012*, Sozopol, Bugarska, 2012.
- [21] Carestream Health, Inc.: „Carestream Industrex Digital Imaging Plates“, *Technical data/ Non- destructive testing*, TI- 2632, New York, SAD, 2013.
- [22] Carestream Health, Inc.: „NDT Imaging Plates“, New York, SAD, 2014.
- [23] Halmslaw, R., Kowol, T.: „Image quality indicators in industrial radiography“, sa interneta: http://www.cmarques.com.br/dbimg/pdf/85_115.pdf, pristupljeno 20. studenog 2014.
- [24] NDT Supply: „NDT Duplex Penetrameter“, sa interneta: <http://ndtsupply.com/ndt-duplex-penetrameters.html>, pristupljeno 20. studenog 2014.
- [25] Sa interneta: http://www.academia.edu/7877713/Table_5_Wire_Type_IQI_Selection_Table_1_-DIN_Wire_Type_IQI_DIN_Pack_Designation_Wire_Diameter_mm_inch_Corresponding_Wire_Number_1_FE_DIN_Table_2_-

ISO_Wire_Type_IQI_ISO_Pack_Designation_Wire_Diameter_mm_inch_Corresponding_Wire_Number, pristupljeno 21. studenog 2014.

- [26] Virtual Media Integration: „VMI 5100MS CR Scanner“, sa interneta: <http://www.starrview.com/lists/1-products/items/15-vmi-5100ms-cr-scanner>, pristupljeno 22. studenog 2014.

PRILOZI

- I. CD- R disk