

Struktura i funkcija holoenzima na primjeru bakterijske RNA-polimeraze

Bingula, Rea

Undergraduate thesis / Završni rad

2013

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/um:nbn:hr:217:285462>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEU ILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATI KI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

**STRUKTURA I FUNKCIJA HOLOENZIMA NA
PRIMJERU BAKTERIJSKE RNA-POLIMERAZE**

**STRUCTURE AND FUNCTION OF HOLOENZYME
EXEMPLIFIED BY BACTERIAL RNA-POLYMERASE**

SEMINARSKI RAD

Rea Bingula

Preddiplomski studij molekularne biologije
(Undergraduate study of Molecular Biology)
Mentor: prof. dr. sc. Ivana Weygand- uraševi

Sadržaj

1. <u>Uvod</u>	1
2. <u>RNA-polimeraza</u>	2
2.1. <u>Bakterijska RNA-polimeraza</u>	2
2.1.1. <u>Struktura bakterijske RNA-polimeraze</u>	2
2.2. <u>σ-podjedinica</u>	3
2.2.1. <u>Faktori σ^{70} i σ^A</u>	4
2.2.2. <u>Faktor σ^N (σ^{54})</u>	4
2.3. <u>Eukariotska RNA-polimeraza</u>	4
2.4. <u>Sličnost σ i transkripcijskih faktora</u>	4
3. <u>Inicijacija transkripcije</u>	6
3.1. <u>Prijelaz u elongacijsku fazu</u>	6
3.2. <u>Kruženje σ-faktora</u>	7
3.3. <u>Zadržavanje σ-faktora</u>	7
4. <u>Holoenzim</u>	9
4.1. <u>Prepoznavanje i interakcija s promotorom</u>	9
4.2. <u>Utjecaj RNA-polimeraze na molekulu DNA</u>	12
4.3. <u>Interakcije holoenzima i molekule DNA</u>	13
4.4. <u>Utjecaj drugih proteina</u>	15
5. <u>Zaključak</u>	15
6. <u>Literatura</u>	16
7. <u>Sažetak</u>	20
8. <u>Summary</u>	20

Zagreb, 2013.

Zagreb, 2013.

1. UVOD

Enzimi su biokatalizatori koje pronalazimo u svim živim organizmima. Otkriveni su polovicom 19.st. ali prva izolacija i kristalizacija bila je tek 1926.godine (Nelson i Cox, 2008). Već ina enzima i proteini, iako su jedni od prvih enzima bile molekule RNA, a enzimska aktivnost mnogih je zadržana i u današnjem modernom svijetu.

Ako im je za aktivnost potreban neki dodatni element (ion, drugi protein), kofaktor, koji nije stalno vezan za enzim, nazivaju se apoenzimi ili apoproteini. Zajedno s kofaktorom apoenzim i holoenzim. Većina kofaktora ne veže se kovalentno, već ostvaruje vrste međumolekulske interakcije. Holoenzimom se naziva i enzim koji aktivnost postiže tek kada sadrži sve svoje podjedinice, kao u slučaju DNA- i RNA-polimeraza.

Najprije nekoliko riječi o samom procesu u kojem sudjeluje holoenzim RNA-polimeraza. Transkripcija je kao prvi, ujedno i korak u kojem se odvija većinska regulacija u ekspresiji gena. Cijeli proces je sličan replikaciji pomoći u DNA-polimeraze, samo što u transkripciji nisu potrebne poštne koje se „lijepo“ na 3'-kraj lanca kalupa, nego promotorske regije kodirajući lanca koje omogućavaju ispravno povezivanje enzima i molekule DNA.

Promotorske regije su sljedovi nukleotida uzvodno ili na početku gena koji kodiraju proteine (na potezu od 70 baza prije i 30 baza poslije samog početka gena) i mjesto su vezanja holoenzima RNA-polimeraze. U promotorima nalazimo končnici sekvene – sekvene koje među vrstama imaju visoki stupanj sličnosti i učinkosti, te su mjesto specifične interakcije s holoenzimom. (-10)-element (Pribnow sekvenca) je najčešći i esencijalni bakterijski promotorski motiv (Hoch-Barnard i Hinton, 2007; Shultzaberger i sur., 2007). Osim njega kod prokariota je još vrlo često prisutan i (-35)-element. Postoje i različiti dodatni promotori karakteristični za vrste, ali ova dva su prisutna u bakteriji *Escherichia coli*, koja će biti glavni modelni organizam u ovom seminaru.

RNA-polimeraza prepoznaje promotorskiju sekvencu na kodirajućem lancu molekule DNA te ju lokalno odmotava kako bi dobila pristup lancu kalupa po kojem onda sintetizira komplementarnu molekulu RNA, mRNA. Neizostavne komponente transkripcije osim molekule DNA i holoenzima RNA-polimeraze su sve 4 vrste ribonukleozid-trifosfata (uridin-, adenozin-, gvanozin-, citidin-trifosfat) te ioni Mg^{2+} i Zn^{2+} . Lanac RNA nadograđuje se na 3'-hidroksilnom kraju, antiparalelno lancu kalupu.

Cilj ovog seminarskog rada je bio proučiti interakcije podjedinica holoenzima unutar kompleksa i s molekulom DNA u prvim koracima transkripcije.

2. RNA-POLIMERAZA

RNA-polimeraza (tj. DNA-ovisna RNA-polimeraza) je mnogopodjedini ni enzimatski kompleks odgovoran za proces transkripcije. Itaju i gensku uputu s kodiraju eg lanca DNA , lancu kalupu sintetizira komplementarnu molekulu mRNA potrebnu za daljnju sintezu proteina, translaciju. Razli iti tipovi RNA-polimeraza u sve tri domene života pokazuju evolucijsku konzerviranost (Ebright, 2000) sekvence, strukture i kataliti kog mehanizmu (Lane i Darst, 2010), razlike se naj eš e nalaze u postupku inicijacije samog procesa transkripcije.

2.1. Bakterijska RNA-polimeraza

Bakterijska RNA-polimeraza velik je i kompleksan enzim sastavljen od 5 podjedinica koje ine srž (σ SS'Š, Mr 388 981). Za razliku od eukariotske, bakterijska RNA-polimeraza sve 3 funkcije (inicijacija, elongacija, terminacija) obavlja samostalno (bez brojnih pomo nih proteina): pronalazak mjesta inicijacije, odmatanje dvolan ane molekule DNA, interakcija s reguliraju im proteinima, kataliziranje stvaranja fosfodiesterske veze, pronalazak terminacijskog signala. Ipak, prema ve ini literaturnih navoda enzimu nedostaje dio za provjeru novosintetiziranog mRNA lanca, tj. 3'-5' egzonukleazna aktivnost ime je u estalost pogreške pove ana na jednu grešku svakih 10^4 - 10^5 ugra enih nukleotida. No, zbog velikog broja nastalih molekula mRNA i njihovom relativno kratkom životnom vijeku (pogotovo kod prokariota) ta razina pogreške je prihvatljiva. Mnoge RNA-polimeraze ipak mogu direktno hidrolizirati posljednji krivo ugra eni nukleotid još nepoznatim mehanizmom (Nelson i Cox, 2008).

2.1.1. Struktura bakterijske RNA-polimeraze

Srž RNA-polimeraze je neophodna i služi slijede im funkcijama: otkrivanje mjesta prepoznavanja na σ -podjedinici i poja avanje vezanja pomo u dodatnih nespecifi nih interakcija s molekulom DNA (u fazi inicijacije) te polimeraznom aktivnoš u (u fazi elongacije) (Young i sur., 2001). Sama srž oblikom nalikuje rakovim kliještima, kojima su dvije najve e podjedinice (β i β') krakovi (Zhang i sur., 1999). Svaka od njih sastavljena je od 4 strukturna modula, koji su povezani ili neesencijalnim aminokiselinskim sekvencama ili me usobno razdvojeni (Kulbachinskiy i sur., 1999). Najmanje 6 razli itih modula sudjeluje u formaciji aktivnog mjesta, indiciraju i da su te dvije podjedinice blisko povezane u

globularnoj srži (Mustaev i sur., 1997). Promjer udubljenja aktivnog mjesta je 25 \AA^1 , dovoljan da stane dvolan ana nukleinska kiselina. U njemu se još nalazi i ion magnezija (Mg^{2+}). Dvije identične α -podjedinice nalaze se distalno od udubljenja, jedna interagira s podjednicom β (α'), a druga s β' (α''). Svaka od α -podjedinica sadrži dvije domene: N-terminalnu (α NTD, koja interagira s β , tj. β') i C-terminalnu domenu (α CTD, odgovornu za sekvencno-specifične interakcije protein-DNA s uzvodnim aktivatorima i represorima). Podjedinica ω se takođe nalazi distalno, ali u kontaktu je samo s podjedinicom β' (Naryshkin i sur., 2000).

2.2. σ -podjedinica

σ -podjedinica je šesta, dodatna podjedinica (σ -faktor) koja se sa srži enzima spaja u holoenzim. Dvije su obitelji σ faktora - veća obitelj obuhvaće faktore s velikom strukturnom i funkcionalnom sličnošću s faktorom σ^{70} , odgovornim za transkripciju glavnih „housekeeping“ gena. σ^N je jedini poznati predstavnik druge skupine. Njegova sličnost aminokiselinskog sljeda sa σ^{70} je vrlo mala i postoje znajne razlike u mehanizmu djelovanja RNA-polimeraze kada je asocirana sa svakim od njih. Unatoč tome postoje mnoga zajednička mjesta na samom enzimu s kojim obje obitelji ostvaruju interakciju.

Kod bakterije *Escherichia coli* pronađemo 7 različitih vrsta σ -faktora (Tabela 1.). Njihovo reverzibilno vezanje za RNA-polimerazu omogućava prepoznavanje različitih promotora i prepisivanje različitih skupina gena ovisno o trenutnim potrebama stanice. Selekcija promotora prema tome ovisi o kompeticiji među faktorima, njihovoj zastupljenosti, afinitetu za srž enzima i prisutnosti anti- σ faktora (Ishihama, 1997).

Tabela 1. σ -faktori bakterije *Escherichia coli*. *postotak pronađenja u sklopu holoenzima.

σ -podjedinica	(nM)	Molekulska mase	Holoenzimski omjer (%)*	Funkcija
σ^{70}	0.26	700	78	Housekeeping geni
σ^{S4}	0.30	110	8	Moduliranje stanicijske razine dušika
σ^{S3}	4.96	<1	0	Geni stacionarne faze
σ^{S5}	1.24	<10	0	Heat shock geni
σ^{S8}	0.74	370	14	Geni za bićeve i kermitaksiju
σ^{S2}	2.45	<10	0	Ekstracitoplazmičke funkcije neke "heat shock"
σ^E	1.73	<1	0	Ekstracitoplazmičke funkcije, uključujući transport Fe ²⁺ citrata

¹ ångström - 10^{-10} m

2.2.1. Faktori σ^{70} i σ^A

σ^{70} je produkt gena rpoD (Ishihama, 2000; Murakami i Darst, 2003) sastavljen od 4 regije (σ_1 , σ_2 , σ_3 , σ_4). Spada u primarne, „housekeeping“ sigma faktore i prepisuje većinu gena koji su produkti potrebnici u esencijalnim metabolizmima putevima. σ^A je ekvivalent σ^{70} u gram-pozitivnim bakterijama.

2.2.2. Faktor σ^N (σ^{54})

σ^N glavna je varijanta σ^{70} . Sastavljen je od 3 regije, a kontrolira transkripciju gena koji se eksprimiraju uslijed specifičnih okolišnih uvjeta (Buck i sur., 2000; Reitzer i Schneider, 2001). Iako bez očitih similarnosti u sekvenci, oba σ -faktora vežu se za ista mesta u enzimu. Ne postoji direktno saznanje o samoj disocijaciji s holoenzima, ali postoje dokazi da je taj korak relativno spor. Bez prisutnosti molekule DNA ili transkripcije, vjeruje se da je vrijeme poluživota holoenzima oko 200 s (Ferguson i sur., 2000).

2.3. Eukariotska RNA-polimeraza

Eukarioti posjeduju tri tipa RNA-polimeraze: I (sinteza preribosomalne RNA), II (sinteza glasnike, mRNA) i III (sinteza tRNA i 5S rRNA).

Iako puno kompleksnija od svog bakterijskog homologa, RNA-polimeraza II s njom dijeli vrlo visoki postotak konzerviranosti strukture, funkcije i samog mehanizma. Sastavljena je od 12 podjedinica od kojih neke vrlo nalikuju bakterijskim.

Kod eukariota općih transkripcijski faktori su neophodni za sam proces i tako su visoko očuvani. Svaki od 4 procesa, sastavljanje kompleksa-inicijacija transkripcije-elongacija-terminacija, uključen je ovim proteinima.

Eukariotskim analogom σ -podjedinice može se nazivati TBP (eng. *TATA-box binding protein*, vezujući protein TATA-kutije), protein koji se veže za promotorsknu sekvencu 5'TATA3'. U procesu transkripcije dolazi kao dio transkripcijskog faktora TFIID (Nelson i Cox, 2008).

2.4. Sličnost i transkripcijskih faktora

Prepoznavanje specifične promotorske sekvene i njeno taljenje blisko su povezani. Kada je stvoren, transkripcijski mjeđusobno vezani s vrsto vezanom σ -podjedinicom izuzetno je stabilan,

izdržavaju i nekoliko krugova abortivne inicijacije prije nego li započne produktivna transkripcija. Ovu ulogu σ -podjedinice kod eukarijota obnašaju op i transkripcijski faktori. Rezultat je isti: ispravni kompleksi s promotorom, stabilizirani interakcijama proteina i molekule DNA, preživljavaju, dok su nespecifični kompleksi, nedovoljno stabilizirani, kratkoživotni i disociraju. Promotorska specifičnost postiže se kinetičkom provjerom (eng. *proofreading*) (Liu i sur., 2011).

Kristalografijom je utvrđena nevjerovatna strukturalna homologija između eukariotskog transkripcijskog faktora TFIIB i regije σ_3 . Homologija je najprimjetnija između regije na C-kraju TFBII-a i regije σ_3 , te između B-prsta i B-spojnica i spojnice regije σ_3 i σ_4 . B-prst ulazi u aktivni centar polimeraze i dolazi u blizinu lanca kalupa, s kojim može stvarati stabilizirajuće veze. Spojnica regije σ_3 i σ_4 стоји na putu molekuli RNA koja izlazi iz aktivnog centra što dovodi do gubitka uzvodnih veza između promotorske DNA i σ -podjedinice (elementa (-35)) (Liu i sur., 2011). Istovremeno sinteza potencijalne molekule RNA bez otpuštanja promotora dovodi do toga da polimeraza izvija nizvodni dio molekule DNA, stvarajući napetost za koju se vjeruje da potiče kidanje veza između regije σ_2 i promotorskog elementa (-10), i omogućava prijelaz u fazu elongacije. Ista stvar događa se i s eukariotskim B-prstom.

3. Inicijacija transkripcije

Inicijacija transkripcije je bitni dio regulacije ekspresije gena. Uklju uje vezanje holoenzima RNA-polimeraze (navo enog σ -podjedinicom) za dvolan anu molekulu DNA, zatim taljenje promotora, abortivnu inicijaciju i napuštanje promotora. Zapo inje reverzibilnim vezanjem holoenzima za promotorsku sekvencu dvolan ane molekule DNA, što ini zatvoreni kompleks. Dolazi do taljenja promotora, stvaranja transkripcijskog mjehura (od pozicije -12 do +2), tzv. stvaranje otvorenog kompleksa. Po formiranju kompleksa uslijed konformacijskih promjena, holoenzim ulazi u abortivnu inicijaciju, koja je popra ena nepovratnim napuštanjem promotora, procesivnom elongacijom te terminacijom.

Bioinformati ko istraživanje pokazalo je da je regija duga 15 bp, smještena odmah uzvodno od eksperimentalno odre enog po etka transkripcije kod bakterije *Escherichia coli*, sklonija taljenju od drugih regija genoma. 15 bp je upravo veli ina transkripcijskog mjehura. To nije samo 6 od tih 15 baznih parova je sklonije taljenju pri termi kim fluktuacijama, i to oni u (-10)-sekvenci, koji za sobom zatim povla e i ostatak regije (or evi i Bundschuh, 2008).

Otvoreni kompleks nastaje najvjerojatnije u nekoliko (dva) koraka, kroz termi ke fluktuacije promotorske regije, popra ene stabilizacijom formiranog transkripcijskog mjehura interakcijama RNA-polimeraze i kodiraju eg lanca DNA. Najprije se tali (-10)-sekvencia (što je i ograni avaju i korak u reakciji), a zatim slijedi širenje transkripcijskog mjehura. Strukturni podaci govore da su konzervirani aromatski ostaci u σ -podjedinici idealno postavljeni za interakciju s bazama kodiraju eg lanca u regiji -10. Ove interakcije podupiru nastanak po etnog kratkog segmenta rastaljene molekule DNA (~5 bp), koji e formirati uzvodni rub kona nog transkripcijskog mjehura (Murakami i Darst, 2003). Širenje transkripcijskog mjehura od pozicije -10 do +2 postavlja lanac kalup u aktivno mjesto RNA-polimeraze. Postoje zna ajni dokazi da bi konformacijske promjene u RNA-polimerazi odigrale važnu ulogu u drugom koraku prelaska u otvorenji kompleks (npr. potrebno je uklanjanje domene 1.1 RNA-polimeraze iz kanala u aktivnom mjestu kako bi mogao biti uba en lanac kalup (Yuan i sur., 2006)).

3.1. Prijelaz u elongacijsku fazu

Što se doga a sa σ -podjedinicom nakon prelaska u fazu elongacije i danas je tema mnogih rasprava. Uvriježeno mišljenje je da nakon sinteze lanca RNA minimalne duljine od 9 do 11

nukleotida σ^{70} napušta kompleks, tj. da postoji „kruženje σ -faktora“. Ono je utemeljeno na kromatografskim i elektroforetskim analizama, ali ti eksperimenti uklju uju grube postupke odvajanja koji mogu narušiti stabilnost σ^{70} unutar holoenzima. Zato je bilo potrebno razmotriti i alternativni model u kojem se stabilnost interakcija σ^{70} s ostatkom kompleksa smanjuje u prijelazu na elongaciju, zbog nepovoljnih interakcija izme u nastaju e RNA i σ^{70} (Daube i von Hippel, 1999), ali u kojem σ^{70} nije otpuštena.

3.2.1. Kruženje σ -faktora

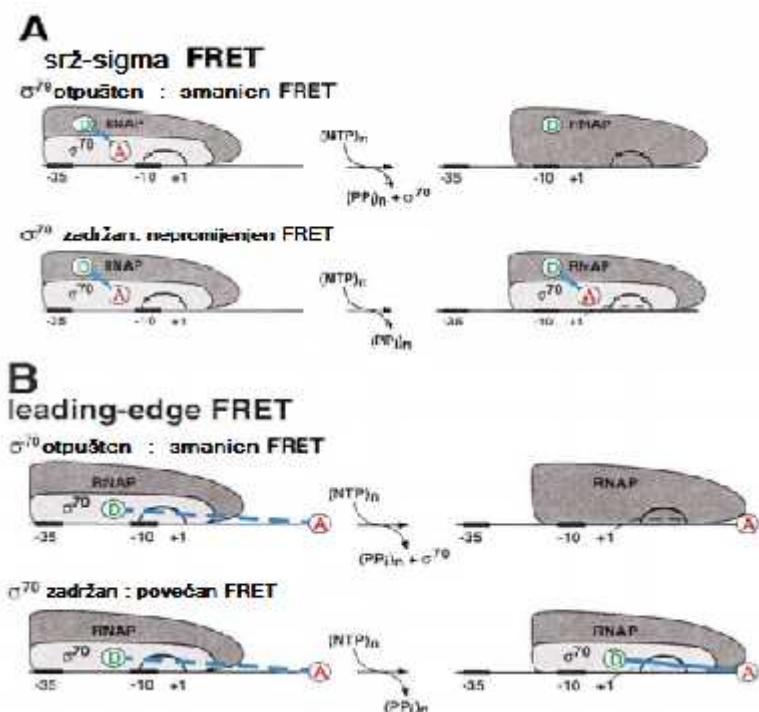
Vjerovalo se da zbog konformacijske promjene holoenzima nakon stvaranja otvorenog kompleksa dolazi do disocijacije σ -podjedinice, koja bi zbog svojeg visokog afiniteta za promotorom usporavala i ometala elongaciju. Uz to otkriven je protein NusA koji kompetira za vezno mjesto σ -podjedinice unutar holoenzima i smatralo se da time poti e njenu disocijaciju iz kompleksa. Po završetku transkripcije, NusA svoje mjesto ponovo prepušta jednoj od σ -podjedinica, omogu uju i novu inicijaciju (Nelson i Cox, 2008).

3.2.2. Zadržavanje σ -faktora

Otkrivanje skupina RNA-polimeraza u *E.coli* koje zadržavaju σ^{70} i u elongaciji poljuljalo je prethodnu teoriju. Relativna brojnost takvih grupa ovisi o stani nom rastu i svoj maksimum postiže u stacionarnoj fazi. Takvi holoenzimi imaju zna ajnu prednost u izvo enju nekoliko neprekinutih krugova transkripcije zaredom na odre enim promotorima, što govori o vjerojatnoj ulozi u genskoj ekspresiji i regulaciji kod bakterija (Bar-Nahum i Nudler, 2001).

Afinitetnom kromatografijom utvr eno je da takvi holoenzimi nisu specifi ni samo za jednu vrstu promotora nego njih nekoliko, te da protein NusA uzrokuje terminaciju transkripcije bez potrebe za disocijacijom samog σ^{70} -faktora.

Pomo u metode FRET (eng. *fluorescence resonance energy transfer*, fluorescencijski prijenos energije rezonancijom) (Slika 1.) dokazano je da u ve ini transkripcijskih kompleksa σ^{70} ne disocira s RNA-polimeraze po prijelazu s inicijacije na elongaciju. Metodom se prati kretanje molekule bliske molekuli DNA, ali ona ne uklju uje korake razdvajanja. Korišten je „leading-edge FRET“, u kojem se prati pomicanje fluorescentno obilježene molekule u blizini fluorescentne probe u nizvodnom smjeru na molekuli DNA, i upravo je njime utvr en ovaj fenomen.



Slika 1. Predviđanja rezultata pokusa upotrebom metode FRET. A – fluorescentni donor je ugrađen u RNA-polimerazu, a fluorescentni akceptor unutar podjedinice σ^70 ; B – fluorescentni donor je ugrađen u podjedinicu σ^70 , a fluorescentni akceptor nizvodno na molekuli DNA, (Mukhopadhyay i sur., 2001).

Rezultati su pokazali da je u 100% transkripcijskih kompleksa σ^70 ostala asocirana i translocirana s RNA-polimerazom u prijelazu u elongaciju. U otvorenom kompleksu 9 nukleotida molekule RNA prisutno je kao hibrid RNA-DNA s lancem kalupom, a 2 nukleotida nalaze se u izlaznom kanalu molekule RNA koju tvori RNA-polimeraza, i može sadržavati 5 nukleotida (Korzheva i sur., 2000; Ebright, 2000). 70% transkripcijskih kompleksa zadržalo je σ^70 po i nakon popunjavanja izlaznog kanala, a 60-70% i nakon sinteze RNA od 50 nukleotida u dužini. Ovo istraživanje opovrgava postojanje bitne mehaničke razlike između inicijacije i elongacije (Mukhopadhyay i sur., 2001).

Orijentacija σ^70 u odnosu na polimerazu u otvorenom i u elongacijskom kompleksu je gotovo identična: regija σ_1 nalazi se u blizini nizvodne polovice transkripcijskog mjeđura, σ_2 blizu centra i uzvodne polovice mjeđura, a σ_3 i σ_4 uzvodno od transkripcijskog mjeđura (Naryshkin i sur., 2000; Ebright, 2000). σ^70 veže jednaku sekvencu (sekvencu (-10) na kodirajućem lancu) i u otvorenom kompleksu, pokazujući da je to dio normalnog procesa stvaranja otvorenog kompleksa (Young i sur., 2001).

4. Holoenzim

Slobodna σ -podjedinica (izvan kompleksa s enzimom) ne veže molekulu DNA. U holoenzimu molekula DNA prelazi preko jedne strane RNA-polimeraze, potpuno izvan aktivnog mesta tako da se svi sekvencno-specifični kontakti s lancima ostvaruju preko σ -podjedinice (Murakami i sur., 2002).

Razmak između promotorskih sekvenca, njihova udaljenost od početka transkripcije utječe na samu jačinu vezanja holoenzima i započinjanje transkripcije.

4.1. Prepoznavanje i interakcija s promotorom

Svaka od 4 konzervirane regije σ^{70} -podjedinice ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$) ostvara kontakt s određenim dijelom promotora ili enzima. Kod bakterije *Escherichia coli* unakrsnim fotopovezivanjem utvrđeno je 66 veza između promotorske regije i RNA-polimeraze, te 19 između promotorske DNA i σ^{70} (σ_1 – nije sašiven, σ_2 – (-10)-element, σ_3 – produženi (-10)-element, σ_4 – (-35)-element). σ_2 „pokriva“ DNA u aktivnom centru, a σ_3 i σ_4 nalaze se izvan centra (Naryshkin i sur., 2000). Kao što je navedeno, faktor prepozna 2 koncentruse sekvene – 5' TATAAT 3', 10, te 5' TTGACA 3', 35 baznih parova (bp) uzvodno od početka gena. Treća AT-bogata regija, tako zvana UP-element (uzvodni promotor), nalazi se između 40 i 60 bp uzvodno od početka gena kod promotora jako eksprimiranih gena, ali nju veže α -podjedinica RNA-polimeraze (Nelson i Cox, 2008).

σ^{54} kao promotore prepozna pozicije -24 (GG) i -12 (GC). Za razliku od σ^{70} koji u kompleksu s RNA-polimerazom spontano izomerizira u otvoreni kompleks, σ^{54} zahtjeva hidrolizu ATP-a pomoću aktivatorskih proteina koji se vežu za početku regije (bEBP, eng. *bacterial enhancer binding proteins*, bakterijski proteini koji vežu početak gena) (Bose i sur., 2008). Ovaj proces nalikuje na onaj eukarijotske RNA-polimeraze II, kada transkripcijski faktor TFIIH trošenjem ATP-a razmata molekulu DNA (Kim i sur., 2000; Lin i sur., 2005).

σ^A kod *Thermus aquaticus* prepozna i neke dodatne promotorske elemente (Tabela 2). Pomoću aptamera² utvrđeno je da je za vezanje σ^A -podjedinice bitan slijed 5' GGAA 3', koji se nizvodno nastavlja na 5' TATAAT 3' sekvencu. On omogućuje inicijaciju transkripcije bez prepoznavanja sekvene na poziciji -35. Tako je prisutnost „produženog“ (-10)-promotora, tj. dodatak TG-motiva jedan bazni par uzvodno od standardne (-10)-sekvene

² oligonukleinska kiselina ili peptidna molekula koja se veže za specifičnu molekulsku metu

najčešće uključuje potpuno izostajanje (-35)-sekvence. Uklanjanje GGGA-motiva u prisutnosti (-35)-elementa inhibiralo je transkripciju pomoći u Taq-polimeraze. On omogućuje prepoznavanje promotora i stvaranje kasnije faze otvorenog kompleksa, kada nedostaju (-35)-element i TG-motiv (Feklistov i sur., 2006). Kristalne strukture holoenzima iz *T. aquaticus* i *T. thermophilus* pokazuju da σ -podjedinica sadrži 3 domene povezane fleksibilnim poveznicama. Mjerom udaljenosti metodom luminescentnog prebacivanja energije rezonancijom (LRET, eng. *luminescence resonance energy transfer*) utvrđena je razlika u poziciji u holoenzimu i u slobodnom obliku (Callaci i sur., 1999).

Tabela 2. Podjedinice faktora σ^A bakterije *Thermus aquaticus* i promotorske sekvence sa kojima ostvaruju interakciju

Promotorska regija (5' -> 3')	TTGACA (-35)	TG (produžena -10)	TATAAT (-10)	GGGA
Dio podjedinice	4.2	2.5	2.4	1.2

Kristalografskom su utvrđeni univerzalno konzervirani aromatski ostaci unutar σ -podjedinice idealno postavljeni za kontakt s izloženim baznim parovima uzvodnog ruba transkripcijskog mjeđuhrama, a univerzalno konzervirani bazi su ostaci regija 2.4 i 3.0 σ -podjedinice osiguravajući kontakt s fosfatnom okosnicom molekule DNA i igraju ulogu u usmjeravanju rastaljenog lanca kalupa u aktivno mjesto RNA-polimeraze, doprinoseći elektrostatskom potencijalu. Struktura rezolucije 2.4 Å *Taq* σ_4^A kompleksa s (-35)-elementom potvrdila je ranija genetska istraživanja (Gross i sur., 1998) koja su pokazivala da aminokiselinski ostaci prepoznavaju α -zavojnice u motivu zavojnica-zavoj-zavojnica regije σ_4 vezuju element -35. U toj strukturi molekula DNA je savinuta oko prepoznavajućih zavojnica za 36°. Dokazi metodom otisaka stopa (eng. *footprinting*) pokazali su da ove interakcije nastaju prve i da se održavaju kroz cijeli proces nastanka otvorenog kompleksa. Unutar konzerviranih regija 2.2 i 3.0 σ_4 su mjesta karakteristične interakcije s molekulom DNA. U regiji 3.0 His⁴⁵⁵ i Glu⁴⁵⁸ (*E. coli*) izloženi na površini α -zavojnice okrenuti su prema velikom utoru produžene (-10)-sekvence molekule DNA, sa kojom interagiraju. U regiji 2.3 visoko učinkoviti aromatski aminokiselinski ostaci (Tyr⁴²⁵, Tyr⁴³⁰, Trp⁴³³) odgovorni su za taljenje promotora na uzvodnom rubu transkripcijskog mjeđuhrama. Univerzalno konzervirani bazi su ostaci u regijama 2.2. i 2.3 (Arg⁴¹⁴, Lys²⁴¹) kritični za vezanje molekule DNA, vjerojatno nespecifično. Oba pozitivno nabijena ostatka interagiraju s negativno nabijenom

okosnicom kodiraju eg lanca na pozicijama -13/-14 (Arg^{414}) i -15 (Lys^{241}) (Murakami i sur., 2002).

σ^{70}_2 specifično se veže za jednolan anu kodiraju u (-10)-regiju. Svaki nukleotid (-10)-sekvence (5' T₋₁₂A₋₁₁T₋₁₀A₋₉A₋₈T₋₇ 3') interagira s proteinom, po modelu ključ-brava. Interakcije koje pronalazimo između proteina i okosnice molekule DNA u svakom (-10)-elementu izuzetno su brojne. Bazno-specifične interakcije primarno se događaju s nukleotidima A₋₁₁ i T₋₇. Struktura i biokemijski podatci podupiru model u kojem prepoznavanje (-10)-elementa, „izvlačenje“ baza iz dvolanane molekule DNA i njihovo vezanje σ-podjedinicom, dovodi do stvaranja otvorenog kompleksa. Aromatski i bazični aminokiselinski ostaci regije σ₂ vjerojatno pomažu u okretanju nukleotida A₋₁₁ potrebnog za ovaj proces i vežu jedan od lanaca DNA kako bi stabilizirali jednolanano stanje. Bitno je imati na umu da je taljenje pokretano termički i da σ-podjedinica može služiti samo u stabilizaciji stanja koje iz toga proizlazi, bez aktivnog trošenja energije (Liu i sur., 2011). Najbitnija uloga σ₂ je osiguravanje povoljnih interakcija s razmotanim (-10)-elementom. Tijekom odmatanja promotora, RNA-polimeraza odmota otprikljike 1.3 zavoja bez utroška energije, također voeno afinitetom enzima za konformnim stanjem, tj. konformacijom promotora u otvorenom kompleksu (Feklistov i Darst, 2011).

5' T₋₁₄G₋₁₃T₋₁₂ 3' tri su nukleotida koji se nalaze na rubu proteinske strukture, od kojih jedino T₋₁₂ stvara znatne interakcije s proteinom (σ-faktorom). Zajedno održavaju strukturu slijedom lancu dvostrukе zavojnice B-oblika, osim što se G nalazi u *syn*-konformaciji. Dvolanano nizvodno od pozicije -12 sprjeava W-dijada (Trp²⁵⁶/Trp²⁵⁷) i ostali elementi proteina. T je favoriziran na poziciji -12, i on ostaje bazno sparen (dvolanano) i u otvorenom kompleksu. W256 stvara opsežne van der Waalsove interakcije primarno s deoksiribozom nukleotida T₋₁₂, W257 s pirimidinskim prstenom, a R246 (Arg²⁴⁶) polarne interakcije s 5'-fosfatnom skupinom. No ove interakcije ostvarene su bez obzira na tip baze. Preferiranost T objašnjava se pomoću Arg²³⁷, koji iz α-zavojnice regije 2.2 σ-podjedinice stvara vodikovu vezu s O4 atomom nukleotida T₋₁₂, a alifatski dio lanca Lys²⁴¹ van der Waalsovnu vezu s C5-metilom. Regija 2.4 sadrži alelno-specifične supresore mutacija u (-10)-elementu - Gln⁴³⁷ još je jedna od potpuno očuvanih aminokiselina u glavnoj skupini σ-faktora, te njegova supstitucija dovodi do nespecifičnog prepoznavanja nukleotida T₋₁₂. Na poziciji -12 u lancu kalupu sparuje se s A, a u kodirajućem s T. Thr⁴⁴⁰ uz malu promjenu strukture također dolazi u doticaj s T (Murakami i sur., 2002).

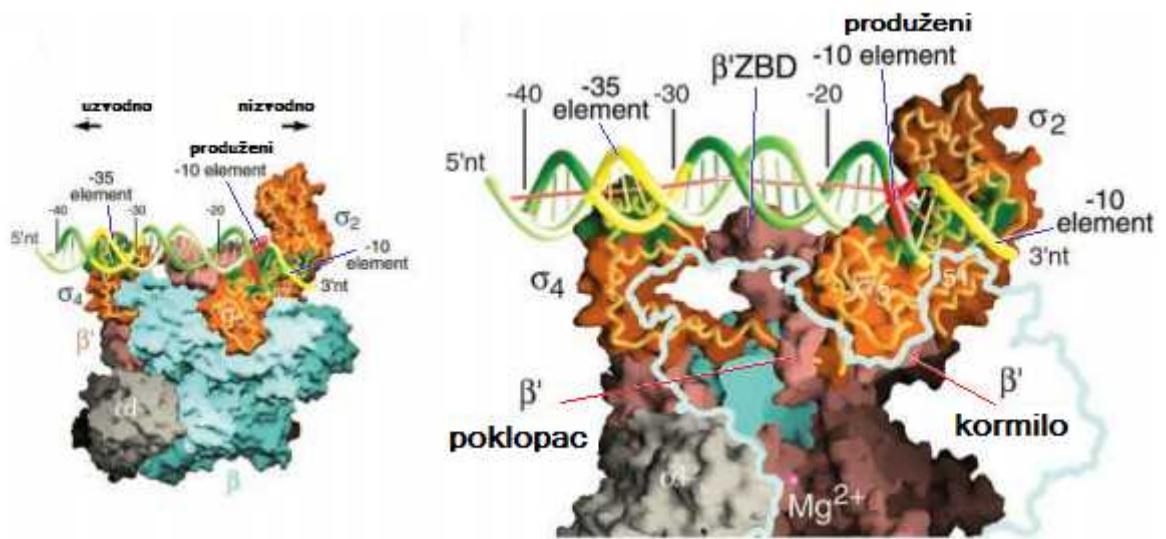
Najo uvanija pozicija (-10)-elementa je A₋₁₁. Njegova mutacija obično uzrokuje potpunu inaktivaciju promotora i nestabilnost otvorenog kompleksa (Lee i sur., 2004; Lim i sur., 2001). W256 iz dijade ostvaruje interakcije s okosnicom nukleotida A₋₁₁ i zauzima mjesto gdje bi se nalazila riboza drugog lanca. Ovo uvjetuje okretanje cijelog nukleotida, ija baza izlazi iz niza baza koji formiraju nukleotidi T₋₁₄G₋₁₃T₋₁₂, i potpuno se ukopava u hidrofobni proteinski džep. Sam džep pun je interakcija koje se ostvaruju isključivo s adeninom i nije ga moguće supstituirati niti jednom drugom bazom (Feklistov i Darst, 2011).

Niz baza T₋₁₀A₋₉A₋₈ ostaje poslagan, u suprotnom smjeru od površine proteina, a interakcija se ostvaruje putem šećerno-fosfatne okosnice. Nastavak niza prekinut je okretanjem nukleotida T₋₇. On ulazi u još jedan proteinski džep koji formiraju konzervirane regije 1.2, 2.1 i 2.3 σ-podjedinice. Ovaj džep je hidrofilan i prostran, te sadrži strogo uređene molekule vode koje sudjeluju u prepoznavanju baze. Ovime je pokazano da je struktura nastalog kompleksa ovisna o gotovo potpunoj uvanosti baza na pozicijama -11 i -7, a nešto manje na preostale tri (Liu i sur., 2011). Izme u σ-podjedinice (Arg²⁰⁸) i molekule DNA (fosfat nukleotida na poziciji -6) nastaje i vrlo bitan ionski most.

4.2. Utjecaj RNA-polimeraze na molekulu DNA

Od pozicije -11 lanci molekule DNA se razdvajaju i kreću u zasebnim putevima. (Slika 2.) Kodirajući lanac s (-10)-sekvencom prolazi regiju σ₂, gdje može interagirati s izloženim aromatskim ostacima σ-regije 2.3. Na potezu od pozicije -2 do +4 lanac prolazi kroz utor između 2 režnja podjedinice β (β₁ i β₂). Tunel u koji mora ući lanac kalup sastavljen je od σ₂, σ₃, β₁, β'-poklopca i β'-kormila. Nizvodni dvolani dio molekule DNA od pozicije +5 do +12 zatvoren je hvataljkom u drugom tunelu između podjedinica β i β'. Taj dvolani dio izuzetno je bitan za stabilnost cjelokupnog kompleksa (Nudler i sur., 1996). Eksperimentalno je utvrđeno da prilikom translokacije enzima molekula DNA mora rotirati unutar kompleksa (Harada i sur., 2001).

RNA-polimeraza u ovim kompleksima stvara mnoge neprimjetne zavoje u uzvodnom području kako bi osigurala što veću podršku za ostvarivanje veza. Na aminokraju β' podjedinice nalazi se Zn²⁺-vezna domena (β'ZBD) koja vjerojatno ostvaruje kontakt s okosnicom molekule DNA između produženog (-10) i (-35) elementa, na poziciji (-22) u lancu kalupu i (-27) u kodirajućem lancu. Na poziciji (-25) molekula DNA se savija za 8° prema velikom utoru koji se nalazi upravo ispred β'ZBD. Na poziciji (-16) molekula DNA oštrosavija prema RNA-polimerazi pod kutem od 37° (Murakami i sur., 2002).



Slika 2. Prikaz *Taq* holoenzima u kontaktu s promotorskim regijama. Regije polimeraze prikazane su slijede im bojama: α I, α II, ω - siva; β - cijano; β' - roza; σ - naran asto. Molekularna površina σ -podjedinice je djelomično prozirna, otkrivajući unutrašnji α -uglavni okosnicu (svjetlo naran asto). Proteinske površine u kontaktu s molekulom DNA su zelene boje, te su isključivo na σ -podjedinici. Lanči molekule DNA su prikazani kao fosfatne okosnice (kalup tamno zeleno, kodirajući i svjetlo zeleno). Elementi -35 i -10 su žuti, a produženi element -10 je crven. (Murakami i sur., 2002)

Neki promotori sadrže UP-eлементе, uzvodne, AT bogate, na pozicijama od -40 do -60). Te elemente prepoznaje i veže α -подјединица C-terminalne domene (α CTD). α CTD je 80-aminokiselinska globularna domena spojena 14-aminokiselinskom spojnicom na α -aminoterminalnu domenu (α NTD), te služi i kao meta mnogih aktivatora transkripcije.

4.3. Interakcije holoenzima i molekule DNA

Selektivno vezanje za promotorskiju (-10)-regiju kodiraju eg lanča ključno je za proces inicijacije. Vezanjem RNA-polimeraze faktor σ^{70} mijenja svoju funkciju. Dok je samostalan slabo veže kodirajući i nešto jači lanac kalup, no vezanjem RNA-polimeraze prepoznavanje lanča kalupa opada, a raste prepoznavanje kodirajući eg, što holoenzimu daje selektivnost. To potvrđuje i injenica da neki aminokiselinski ostaci u regiji 2.3 postaju manje izloženi otapalu nakon vezanja za srž enzima, potvrđujući i alosteričku promjenu.

Nedavno objavljenja kristalna struktura RNA-polimeraze iz *Thermus aquaticus* pokazuju da aminokiseline od 1-550 u β' подјединici imaju dvije hidrofilne regije razdvojene ukopanim hidrofobnim potezom aminokiseline (Zhang i sur., 1999). Jedna od tih hidrofilnih regija potiče selektivno vezanje σ -фактора i kodirajući eg lanča. U pokušu niža temperatura potiče formiranje peptidne zavojnice koja je omogućila $\beta'(260-550)$ -конструкту indukciju

vezanja kodiraju eg lanca, sugeriraju i važnost takve uzvijene zavojnice za funkciju RNA-polimeraze, iako je samo 1/70 cjelokupnog enzima (Young i sur., 2001).

U *E. coli*, σ^{70} sadrži mjesta za prepoznavanje promotora u polovici bližoj C-kraju (Gardella i sur., 1989; Siegele i sur., 1989). U slobodnom obliku, ta mjesta su sakrivena kroz interakciju C- i N-kraja, ali postaju izloženi kada se σ veže za srž enzima. Time nastaje funkcionalno sposobna tercijarna struktura s mogu noš u prepoznavanja jednolan ane promotorske sekvene molekule DNA. Pomo u UV-induciranog unakrsnog povezivanja molekule DNA i proteina dokazano je da upravo uvijena zavojnica β' -podjedinice od 48 aminokiselina poti e faktor σ^{70} na obavljanje svoje funkcije gotovo jednak u inkovito kao i sama srž RNA-polimeraze. Interakcija s regijom 2.2 (najo uvijena u obitelji proteina σ^{70}) uzrokuje alosteri ku promjenu u regiji 2.4 koja omogu ava σ^{70} -podjedinici da prepoznae promotorsk regiju (-10) na kodiraju em lancu. Na koji na in djeluje ova alosteri ka regulacija još nije poznato. Kristalografijom je utvr eno da se α -uzvojnica iz regije 2.2 nalazi odmah iza α -uzvojnica koju stvaraju regije 2.3 i 2.4, te je mogu e da jedna uzrokuje promjene u drugoj. Takva interakcija bi mogla stabilizirati konformaciju regije 2.2 i fiksirati aminokiselinske ostatke u zavojnici 2.3-2.4 u konformaciji komplementarnoj kodiraju em lancu, ili pak suprotno, ometati me usobno vezanje zavojnica, izlažu i dodatne hidrofobne ostatke potrebne za vezanje kodiraju eg lanca. Prepoznavanje kodiraju eg lanca je dakle postignuto sa samo 47 kDa, tj. 1/10 holoenzima. (aminokiseline od 262-309). Metodom FRET utvr ena je efikasnost ovog peptida u indukciji vezanja σ^{70} za kodiraju i lanac od 65% u odnosu na cjelokupni enzim (Young i sur., 2001).

Iako interakcija uvijene zavojnice podjedinice β' i regije 2.2 ima jasan utjecaj na aktivnost σ^{70} , još nije poznato postoji li i neki utjecaj na samu aktivnost RNA-polimeraze. No uvijena zavojnica podupire kormilo, prstu-sli nu strukturu, za koju se vjeruje da sudjeluje u razdvajanju RNA/DNA hibrida (Korzheva i sur., 2000; Zhang i sur., 1999). Nije isklju eno da interakcija uvijene zavojnice i σ^{70} može promijeniti položaj kormila, udaljiti ga od po etne pozicije i time ukloniti steri ke smetnje izme u kormila i promotorske DNA tijekom inicijacije.

U doticaju s molekulom DNA domena hvataljke RNA-polimeraze, zajedno s vezanom regijom σ_2 , rotira prema kanalu za 3° , dodatno ga zatvaraju i β -poklopac, zajedno s vezanom regijom σ_4 , rotira za 4° , rezultiraju i nizvodnim pomicanjem zavojnice regije σ_4 koja zatim prepoznae promotorski element (-35) (Murakami i sur., 2002).

Mjesta na srži enzima koja nespecifično vežu molekulu DNA nalaze se i na β i na β' podjedinici. Nakon asocijacije sa σ^{70} , te interakcije nestaju. To je u skladu s prvim pretpostavkama da po završetku inicijacije σ -faktor disocira, a da srž enzima onda ostvaruje interakcije s RNA-prodукtom ili DNA-kalupom (Krakow i von der Helm, 1970).

4.4. Utjecaj drugih proteina

Rsd je protein od 158 aminokiselina koji interagira s faktorom σ^{70} (Jishage i Ishihama, 1998) stvarajući kompleks u omjeru 1:1 (Westblade i sur., 2004) i sprjeava ga u asocijaciji sa srži RNA-polimeraze.

Pomoću nanoproto ne elektroraspršivačke masene spektrometrije (eng. *nanoflow electrospray mass spectrometry*), zajedno s tandemnom masenom spektrometrijom, proučavana je interakcija σ^{70} i srži RNA-polimeraze. Protein Rsd je regulator σ^{70} i veže ga u njegovoj slobodnoj formi, ali takođe interagira i sa srži enzima. Dodavanjem veće količine zamjenjuje σ^{70} i stvara kompleks Rsd:srž polimeraze te Rsd: σ^{70} , kojem prethodi nestabilan ternarni kompleks Rsd: σ^{70} :srž polimeraze (Ilag i sur., 2004). Nagavlja se da Rsd u kompleksu s RNA-polimerazom ima ulogu u navođenju na određene skupine promotora.

5. Zaključak

σ -podjedinica neophodna je za obavljanje funkcije holoenzima. Evolucijom je postala specifična za određene promotore te različitim mehanizmima i interakcijama s drugim molekulama omogućava preciznu regulaciju genske ekspresije.

Interakcije dijelova inicijacijskog kompleksa međusobno su ovisne i isprepletene, te je potpuna ovisnost specifičnih sljedova ključa za pravilno odvijanje inicijacije. σ -faktor zadržava se i u kasnijim fazama transkripcije, te možda igra i neku do sada nepoznatu ulogu.

6. Literatura

1. Bar-Nahum, G., Nudler, E. (2001). Isolation and characterization of σ^{70} -retaining transcription elongation complexes from *Escherichia coli*. *Cell* 106, 443-451
2. Bose, D., Pape, T., Burrowa, P.C., Rappas, M., Wigneshweraraj, S.R., Buck, M., Zhang, X. (2008). Organization of an activator-bound RNA polymerase holoenzyme. *Molecular Cell* 32, 337–346
3. Buck, M., Gallegos, M.T., Studholme, D.J., Guo, Y., Gralla, J.D. (2000). The bacterial enhancer-dependent σ^{54} (σ^N) transcription factor. *J. Bacteriol.* 182, 4129–4136.
4. Callaci, S., Heyduk, T. (1998). Conformation and DNA binding properties of a single-stranded DNA binding region of sigma 70 sub-unit from *Escherichia coli* RNA polymerase are modulated by an interaction with the core enzyme. *Biochemistry* 37, 3312–3320.
5. Daube, S., von Hippel, P. (1999). Interactions of *Escherichia coli* σ^{70} within the transcription elongation complex. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96, 8390–8395.
6. or evi , M., Bundschuh, R. (2008). Formation of the open complex by bacterial RNA polymerase – a quantitative model. *Biophysical Journal* 94, 4233-4248
7. Ebright, R. (2000). RNA polymerase: structural similarities between bacterial RNA polymerase and eukaryotic RNA polymerase II. *J. Mol. Biol.* 304, 687–689.
8. Feklistov, A., Barinova, N., Sevastyanova, A., Heyduk, E., Bass, I., Vvedenskaya, I., Kuznedelov, K., Merkiene, E., Stavrovskaya, E., Klimašauskas, S., Nikiforov, V., Heyduk, T., Severinov, K., Kulbachinskiy, A. (2006). A basal promoter element recognized by free RNA polymerase σ subunit determines promoter recognition by RNA polymerase holoenzyme. *Molecular Cell* 23, 97-107
9. Feklistov, A., Darst, S.A. (2011) Structural basis for promoter -10 element recognition by the bacterial RNA polymerase σ subunit. *Cell* 147, 1257-1269
10. Ferguson, A.L., Hughes, A.D., Tufail, U., Baumann, C. G., Scott, D. J., Hogget, J. G. (2000). Interaction of σ^{70} with *Escherichia coli* RNA polymerase core enzyme studied by surface plasmon resonance. *FEBS Letters* 481, 281-284
11. Gardella, T., Moyle, H., Susskind, M.M. (1989) A mutant *Escherichia coli* σ^{70} subunit of RNA polymerase with altered promoter specificity *J. Mol. Biol.* 206, 579-590.

12. Gross, C. A., Chan, C., Dombroski, A., Gruber, T., Sharp, M., Rupy, J., Young, B. (1998). The functional and regulatory roles of sigma factors in transcription. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 63, 141-155
13. Harada, Y., Ohara, O., Takatsuki, A., Itoh, H., Shimamoto, N., Kinoshita, K. (2011) Direct observation of DNA rotation during transcription by *Escherichia coli* RNA-polymerase. *Nature* 409, 113-115
14. Hook-Barnard, I.G., Hinton, D.M. (2007). Transcription initiation by mix and match elements: flexibility for polymerase binding to bacterial promoters. *Gene Regul. Syst. Bio* 1, 275–293.
15. Ilag, L.L., Westblade, L.F., Deshayes, C., Kolb, A., Busby, S.J.W., Robinson, C.V. (2004). Mass spectrometry of *Escherichia coli* RNA polymerase: Interactions of the core enzyme with σ^{70} and Rsd protein. *Structure* 12, 269-275
16. Ishihama, A. (1997) Promoter selectivity control of RNA polymerase. *Nucleic Acids Mol. Biol.* 11, 51-70.
17. Ishihama, A. (2000). Functional modulation of *Escherichia coli* RNA polymerase. *Annu. Rev. microbiol.* 54, 499–518
18. Jishage, M., Ishihama, A. (1998). A stationary phase protein in *Escherichia coli* with binding activity to the major sigma subunit of RNA polymerase. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95, 4953–4958.
19. Kim, T.K., Ebright, R.H., Reinberg, D. (2000). Mechanism of ATP-dependent promoter melting by transcription factor IIH. *Science* 288, 1418–1422.
20. Korzheva, N., Mustaev, A., Kozlov, M., Malhotra, A., Nikiforov, V., Goldfarb, A., Darst, S.A. (2000). A structural model of transcription elongation. *Science* 289, 619–625.
21. Krakow, J.S., von der Helm, K. (1970) Azotobacter RNA Polymerase Transitions and the Release of Sigma. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 35, 73-83.
22. Kulbachinskiy, A., Mustaev, A., Goldfarb, A., Nikiforov, V. (1999) Interaction with free β' subunit unmasks DNA-binding domain of RNA polymerase σ subunit. *FEBS Letters* 454, 71-74
23. Lane, W.J., Darst, S.A. (2010). Molecular evolution of multisubunit RNA polymerases: sequence analysis. *J. Mol. Biol.* 395, 671–685.
24. Lee, H.J., Lim, H.M., Adhya, S. (2004). An unsubstituted C2 hydrogen of adenine is critical and sufficient at the -11 position of a promoter to signal base pair deformation. *J. Biol. Chem.* 279, 16899–16902.

25. Lim, H.M., Lee, H.J., Roy, S., Adhya, S. (2001). A “master” in base unpairing during isomerization of a promoter upon RNA polymerase binding. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 98, 14849–14852.
26. Lin, Y.C., Choi, W.S., Gralla, J.D. (2005). TFIIH XPB mutants suggest a unified bacterial-like mechanism for promoter opening but not escape. Nat.Struct. Mol. Biol. 12, 603–607.
27. Liu, X., Bushnell, D.A., Kornberg, R.D. (2011). Lock and key to transcription: σ -DNA interaction. Cell 147, 1218-1219
28. Mukhopadhyay, Y., Kapanidis, A.N., Mekler, V., Kotrkhonja, E., Ebright, Y.W., Ebright, R. H. (2001). Translocation of σ^{70} with RNA polymerase during transcription: fluorescence resonance energy transfer assay for movement relative to DNA. Cell 106, 453-463
29. Murakami, K.S., Darst., S.A. (2003). Bacterial RNA polymerases: the whole story. Curr. Opin. Struct. Biol. 13, 31–39.
30. Murakami, K.S., Masuda, S., Campbell, E.A., Muzzin, O., Darst, S.A. (2002). Structural basis od transcription initiation: an RNA polymerase holoenzyme-DNA complex. Science 296, 1285-1290
31. Mustaev, A., Kozlov, M., Markovtsov, V., Zaychikov, E., Denissova, L., Goldfarb, A. (1997) Proc. Natl. Acad. Sci. USA 94, 6641-6645.
32. Naryshkin, N., Revyakin, A., Kim, Y., Mekler, V., Ebright, R.H. (2000) Structural organization of the RNA polymerase-ptomoter open complex. Cell 101, 601-611
33. Nelson, D.L., Cox, M.M. (2008) *Lehninger Principles of Biochemistry*; Fifth edition, W.H. Freeman and Company, New York, 1021-1033
34. Nudler, E., Avetissova, E., Markovtsov, V., Goldfarb, A. (1996) Transcription Processivity: Protein-DNA Interactions Holding Together the Elongation Complex. Science 273, 211-217
35. Reitzer, L., Schneider, B.L. (2001). Metabolic context and possible physiological themes of σ^{54} -dependent genes in *Escherichia coli*. Microbiol. Mol.Biol. Rev. 65, 422–444.
36. Shultzaberger, R.K., Chen, Z., Lewis, K.A., Schneider, T.D. (2007). Anatomy of *Escherichia coli* σ^{70} promoters. Nucleic Acids Res. 35, 771–788.

37. Siegele, D.A., Hu, J.C., Walter, W.A., Gross, C.A. (1989) Altered promoter recognition by mutant forms of the σ^{70} subunit of *Escherichia coli* RNA polymerase. *J. Mol. Biol.* 206, 591-603.
38. Westblade, L.F., Ilag, L.L., Powell, A.K., Scott, D.J., Kolb, A., Robinson, C.V., Busby, S.J.W. (2004). Studies of *Escherichia coli* Rsd protein and its interaction with the RNA polymerase σ^{70} subunit. *J. Mol. Biol.* 335, 685–692.
39. Young, B.A., Anthony, L.C., Gruber, T.M., Arthur, T.M., Heyduk, E., Chi Zen Lu, Sharp, M.M., Heyduk, T., Burgess, R.R., Gross, C.A. (2001). A coiled-coil from the RNA polymerase β' subunit allosterically induces selective nontemplate strand binding by σ^{70} . *Cell* 105, 935-944
40. Yuan, C., E. Rhoades, X.W. Lou, Archer, L.A. (2006). Spontaneous sharp bending of DNA: role of melting bubbles. *Nucleic Acids Res.* 34, 45-54.
41. Zhang, G., Campbell, E.A., Minakhin, L., Richter, C., Severinov, K., Darst, S.A. (1999). Crystal structure of *Thermus aquaticus* core RNA polymerase at 3.3 Å° resolution. *Cell* 98, 811–824.

7. Sažetak

RNA-polimeraza zajedno sa σ -podjedinicom ini holoenzim sposoban za specifično prepoznavanje promotorske sekvene te započinjanje važnog procesa u genskoj ekspresiji, transkripcije. Međusobno vezanje promotorskih sljedova, polimeraze i σ -podjedinice dovodi do niza alosteričkih promjena – otkrivanje veznih sljedova, stvaranje novih ionskih mostova, formiranje aktivnih mesta, de/stabilizacija određenih struktura, itd. koje osiguravaju specifičnost holoenzima za određeni promotor.

Tako da brojne međumolekulske interakcije s bazama promotora održavaju visoku konzerviranost određenih nukleotida (A₋₁₁, T₋₇) u svim domenama.

Jedno od najvažnijih otkrića sigurno je bilo da se σ -podjedinica zadržava nakon same inicijacije jer je time složenost regulacije postala još veća, s obzirom da isti kompleks sada odjednom mora prelaziti između nekoliko stanja u kojima afinitet za nekoliko konstantnih sljedova u određenom trenutku mora rasti ili padati, kako bi se postigao prijelaz s jednog procesa na drugi. Današnje tehnike obilježavanja fluorescentnim probama, kristalografije i masene spektrometrije otvaraju put preciznijim saznanjima o građi i interakcijama ovakvih kompleksnih struktura kao što su holoenzimi te da budunosti vjerojatno mnoge dosadašnje dogme tako da biti poljuljane.

8. Summary

RNA-polymerase together with the σ -subunit creates a holoenzyme capable of specific promoter sequence recognition. Thus it can commence important step of gene expression – transcription. Interwoven binding of promoter sequence, polymerase and σ -subunit leads to a number of allosteric modifications – exposure of binding sequences, salt bridge establishments, active site formation, specific structure de/stabilization, etc., all of which guarantee promoter-specificity of holoenzyme.

Also, numerous intermolecular interactions with promoter bases maintain high conserved nucleotide sequence (A₋₁₁, T₋₇) in all living domains.

One of the biggest discoveries certainly is the retaining of σ -subunit after the initiation. The complexity of regulation has increased even more since the same complex has to recognize the same sequences but with different affinity at different point in time, so the transition from one state to another can be achieved. Nowadays, techniques such as

fluorescence probing, crystallography or mass spectrometry, lead to more precise organization or interaction determination inside the complex structures such as holoenzymes that will probably lead to many reconsiderations of what was thought to be dogmatic.