

## POLÁNYI MIHÁLY A REAKCIÓKINETIKA ÉS A TERMODINAMIKA KAPCSOLATÁRÓL

BÉNYEI ATTILA

Debreceni Egyetem, Fizikai Kémiai Tanszék,  
abenyei@delfin.unideb.hu

### ABSTRACT

Michael Polanyi played a significant role in establishing the modern reaction kinetics and transition state theory. He pioneered by introducing thermodynamic parameters into reaction kinetics. By treating the transition state, i.e., the species at the maximum of the energy-reaction coordinate function as a thermodynamic equilibrium species, Polanyi's and his colleagues' work made it possible to explain the dependence of rate constants on temperature, pressure and external electric field in a unified theoretical frame. Together with other significant works on adsorption theory and X-ray diffraction Michael Polanyi is one of the greatest, although in his time not fully recognised, chemists of the 20th century.

A termodinamika megszabja a természetben lehetséges fizikai, kémiai és biológiai folyamatok kereteit és irányát, de nem szolgáltat elegendő információt a folyamatok időbeliségének tisztázásához. Ennek leírására további empirikus tapasztalatok figyelembevételével a reakciókinetika alkalmas. Mindkét területen számos paradigmaváltás történt a XX. század során. A változások a fogalomhasználat, a kísérleti módszerek és az eredmények interpretálásán túl az alkalmazott matematikai leíró módszereket is érintették. Ennek a korszaknak Polányi Mihály is tevékeny résztvevője volt, akit kémiai munkásságának évtizedeiben a termodinamika és a reakciókinetika mindvégig élénken foglalkoztatott, és a kémia ez utóbbi területét érezte leginkább magáénak.

Tudományos teljesítményét a kémikus Polányi munkásságáról tartott konferencián a fizikai kémia legjelesebb hazai művelői méltatták (Polanyiiana 2003/1-2). A termodinamika és a kinetika viszonyáról kialakított elképzeléseit illetően a tudományos publikációiból kapunk érdekes képet. Mint igazi kutató, az új eredményeket folyamatosan próbálta beilleszteni a korábban jórészt általa kidolgozott elméleti keretekbe. Ez a keret – az aktivált komplex feltételezése a kiindulási anyagoktól a termékek felé vezető reakciókoordináták terében – rendkívül gyümölcsözőnek bizonyult. Polányi elméletét a reakciókinetika és a termodinamika kapcsolatáról, valamint annak távolba mutató, ma is helytálló következményeit legletisztultabban a Nature folyóiratban 1937 során megjelent cikke foglalja össze (Polanyi 1937).

A közleményeket olvasva, több mint fél évszázad távlatából könnyű pálcát törni a szerző felett és eldönteni, hogy egy-egy probléma kifejtésekor a cikkek érvelésének

mely pontjai bizonyultak helyesnek, és hol evezett bizonytalan vizekre a kutató, amikor a sokszor hibákkal terhelt kísérleti eredmények nagyon is hiányos kirakós játékát megkísérelte egységes elméleti keretbe illeszteni. Ugyanakkor nagyon nehéz megállapítani – természetesen szigorúan „a mai tudásunk szerint”; de éppen ennek a kitételnek köszönhetően talán félrevezető is annak boncolgatása –, hogy pontosan meddig jutottak el a természet ok-okozati összefüggéseinek megismerésében a kutatók, esetünkben Polányi és munkatársai.

A paradigmaváltások a tudományban azt eredményezik, hogy a korábbi fogalmak új értelmet kapnak. A publikálásuk idején elvetett vagy kárhozott elméletek új megvilágításba kerülnek, és a korábbi kép egyszerűen kitisztul, mihelyst a kirakós játék egy újabb fontos részlete a helyére kerül. Erre Polányi munkásságának számos fejezete szolgálhat példaként. Persze nem szabad elfelejteni a másik dimenziót, a tudás személyes jellegét sem. Ugyanis a tudományt művelő ember élettapasztalata, sorsa és pályája, neveltetése, de akár családi körülményei is jelentős mértékben visszahatnak a személyétől függetlennek tekintett természeti folyamatok általa adott értelmezéseire. Éppen ennek a mára természetesnek tűnő dimenzióknak az elméleti kidolgozása adja Polányi filozófiai munkásságának sarokkövét. Ebből a szempontból a kémikusi és a filozófusi életmű szerves egésszé válik, bár a hirtelen váltásra, a kémiai kutatások és publikációk 1949-ben bekövetkező lezárására továbbra sem kapjuk meg a választ. Polányi részéről ez mindenképpen tudatos döntés volt, amelynek személyes okait ha keressük, úgy meg is találhatjuk publikációinak utóéletében. Ezzel együtt is alighanem mindörökre homályban maradnak döntésének részletei és időzítésének pontos okai.

Korántsem egyszerű vállalkozás felmérni Polányi elhatározásának személyes terhét, hiszen olyan kutatóról van szó, aki kémiai, s azon belül reakciókinetikai tárgyú cikkeinek tanúsága szerint is rendkívüli módon élvezte gondolatainak közzétételét, nyilvánosság előtti megjelenését, aki az intézményesített párbeszéd – a tudományos publikációs tevékenység – mellett kiterjedt levelezésen keresztül is aktív kapcsolatot tartott fenn tudóstársaival. Hallgatagon is sokat mond az elismerést annyira áhító tudós fájdalomról, hogy szinte semmit sem olvashatunk Polányitól saját kinetikai kutatásainak személyes vonatkozásairól. Ugyanakkor az 1920 és 1923 között Berlinben végzett röntgendiffrakciós kutatások körülményeiről, amelyek inkább csak epizódként említhetők a Polányi-életmű egészét tekintve (Bényei 2003), részletesen beszámol visszaemlékezésében (Polányi 1962:629, Polányi 1969:87). A röntgendiffrakciós kutatások jelentős fejlődését tette lehetővé a Polányi és munkatársai által kidolgozott új módszer, a kristályok forgatása közben végzett adatgyűjtési technika, amelyet mind a mai napig alkalmaznak a laboratóriumi készülékekben.

Ismeretes, hogy az 1920-as és 1930-as években Berlint pezsgő kulturális és tudományos élete a magyar értelmiség egyik célállomásává tette. A téma Polányival kapcsolatos részleteit Frank Tibor korábban már részletesen elemezte e lap hasábjain (Frank 2003:117).

A Kaiser Wilhelm Institut für Faserstoffchemie kutatóintézetben (Berlin-Dahlem) kapott posztdoktori állást Polányi is ugródeszkának tekintette, hogy a kor legjelentősebb fizikokémikusával, Fritz Haberrel dolgozhasson együtt a reakciókinetika területén. Ez a kívánsága 1923-ban teljesült, amikor Haber az általa vezetett intézetbe, az Institut für Physikalische Chemie und Electrochemie-be hívta dolgozni maga mellé, ahol később Polányi lett Haber utóda.

Polányi adszorpciós elmélete évtizedekkel megelőzte korát, de közlésekor értetlenséggel találkozott, és ezért nem került elfogadásra. Az általa javasolt adszorpciós potenciál egyik következménye ugyanis az adszorbensen kialakuló többszörös borítottság volt. Ez viszont nem bizonyult összeegyeztethetőnek az akkoriban a kémiai kötés alapjaként leginkább elfogadott elektrosztatikus kölcsönhatás, valamint a molekulák képződéséért felelősnek tartott vegyérték-erők természetével. Polányi elméletét egy évtizeddel később lehetett csak beilleszteni az elfogadott képbe, miután felismerték a London-féle diszperziós kölcsönhatás jelentőségét, és válhatott a természetről alkotott kirakós játék fontos részévé. Semmiképpen sem tekinthetjük tehát véletlennek, hogy a nagy szerelem, a reakciókinetika vizsgálatáról nincs Polányi tollából származó hasonló visszaemlékezés a birtokunkban. A külső körülmények hatását világosan jelzi a következő eset.

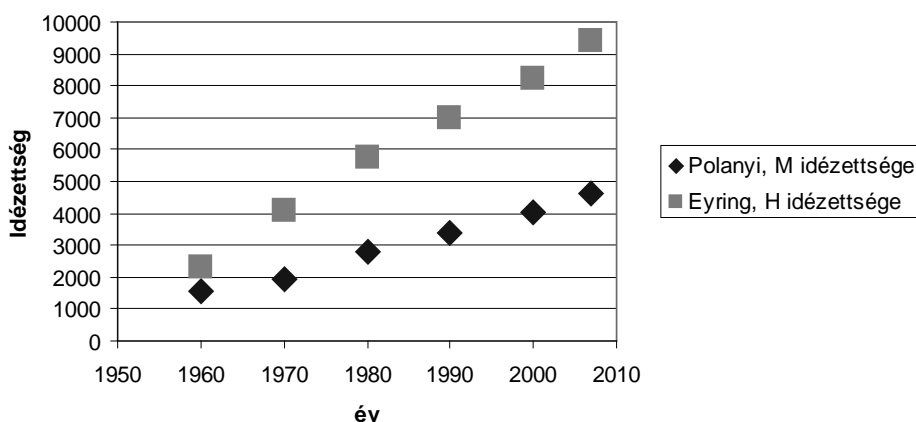
Amikor Polányi P. Ewald felkérésére a röntgensugarak felfedezésének ötvenedik évfordulója alkalmából több tucatnyi ezen a területen működő kutatóval együtt megírja visszaemlékezését a röntgendiffrakció témakörében végzett kutatásairól (Polányi 1969:99), ekképpen fogalmaz: *„Emlékezetből kell megpróbálnom rekonstruálni az akkori eredményeim megszületésének körülményeit, mivel még a saját közleményeim sem állnak rendelkezésemre”* („...without access even to my own papers”).\* Ebben a néhány szóban ott rejtőzik a Németországból való menekülés és a világgégés tragédiája, az új – immár harmadik – otthon megteremtésének nehézsége Manchesterben, továbbá az anyagi, erkölcsi és egyéb problémák sokasága. Mindez tulajdonképpen attól függetlenül így van, hogy ténylegesen elérhetetlennek bizonyultak-e Polányi számára 1961-62-ben Oxfordban – ahol a visszaemlékezést vélhetően írta – az 1920-30 között Németországban publikált cikkei.

Az eredmények és következtetések elfogadtatása, elismerése a versenytársak, illetve a közvélemény részéről, valamint maga a közszereplés is mélyen emberi dolgok. A mai fragmentált, de mégis jól szervezett életünkben legnyilvánvalóbban a sport és a média szereplőinek magatartásán figyelhető meg az elismerés és az ismertség óhajától motivált küzdelem. A mindennapok során saját mikrokörnyezetünkben – beleértve az Internet segítségével kialakított virtuális mikrokörnyezeteket is – bármelyikünk átérezheti és folytatja ezt a hol inkább, hol pedig kevésbé játékos küzdelmet az ismertségért és a sikerért. Ez az ismertség és siker iránti vágy mindenképpen az ember társas mivoltával függ össze, és a szociológia valamint

\* A magyarul nem hozzáférhető idézeteket a szerző fordította. [szerk.]

a pszichológia eszközeivel végigvitt elemzése már az egyén szintjén is érdekes eredményekre vezethet.

A kortárs tudomány területén a hivatkozások számának többé-kevésbé precíz mérésével megpróbálhatjuk az elismertséget (a sikert) mennyiségileg is meghatározni. Ismeretes, hogy a mennyiségi mutatók bizonyos határok között az egyes kutatók teljesítményének mérésére is használatosak. Bár a módszer sok buktatót rejt magában, sokan tiltakoznak is a megjelent cikkek impakt faktorának mechanikus alkalmazása ellen, de komolyan nem szokás manapság elvitatni az ilyen mérőszámok értékelés során megmutatkozó hasznát. Érdemes tehát összevetnünk Polányi Mihály és az egykori munkatárs, későbbi nagy vetélytárs Henry Eyring idézettségét a Science Citation Index (2007) alapján (1. ábra).



1. ábra. Polányi Mihály és Henry Eyring idézettsége a Science Citation Index (2007) alapján. Az adatok a kummulatív idézések számát mutatják napjainkig.

Az adatok az elektronikus adatbevitel hiányosságai miatt korántsem tekinthetők teljesnek, de jól mutatják, hogy napjainkban is évente több mint száz alkalommal idézik Polányi kémiai tárgyú közleményeit. Eyring 1929-30-ban Berlinben dolgozott a Polányi vezetésével működő Institut für Physikalische Chemie fizikai kémiai kutatóintézetben. Közös közleményük az aktiválási energia kiszámításáról egy egyszerű reakcióban 1930-ban (Polanyi-Eyring 1930), míg a gázreakciók kinetikájáról írt közleményük 1931-ben jelent meg (Eyring-Polanyi 1931). A későbbiek során a Polányi által oly behatóan elemzett tudományos közösség sajátos működése, az eredmények elfogadásának bonyolult mechanizmusa végül is azt eredményezte, hogy Eyring a Polányitól tanultakat is kamatoztatva méltónak találtatott a Nobel díj elnyerésére, míg az induló lépést irányító Polányi nem kapta meg ugyanezt – az általa egyébként feltételezhetően remélt – elismerést. Ebből a szempontból különösen figyelemre méltó a folyamatosan érkező idézések nagy száma.

A kémiai reakciók tanulmányozása során a kiindulási anyagok és termékek mibenlétének sok esetben nagyon is problematikus tisztázását követően megpróbáljuk

felderíteni, hogy miképpen befolyásolják a külső körülmények a reakció lefolyását, sebességét. Ilyen külső körülmény lehet a kiindulási anyagok és a termékek – illetve egyéb anyagok (pl. katalizátorok és inhibitorok) – koncentrációja, a hőmérséklet, a nyomás, az oldószer minősége vagy az ionerősség stb. Mindez számos kísérleti nehézséget jelent napjainkban is annak ellenére, hogy a vegyészek évszázadok óta dolgoznak a felsorolt hatások pontos feltérképezésén egy-egy adott reakció esetében.

Arrheniusról nevezték el azt az empirikus összefüggést, amelyik a reakció hőmérsékletfüggését írja le. A legtöbb esetben a hőmérséklet csökkenése vagy növekedése a reakció sebességének exponenciális megváltozását eredményezi:

$$k = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad \text{és} \quad \ln k = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (1)$$

Az exponenciális és logaritmikus alakban is felírt összefüggésben szereplő  $k$  a reakciósebességi állandó, a reakciót leíró sebességi egyenlet azon tényezője, amelyik közvetlenül nem függ a koncentrációktól, míg  $A$  az úgynevezett pre-exponenciális tényező,  $R$  a gázállandó,  $T$  a hőmérséklet Kelvin fokban mérve, végül pedig az  $E$  egy energia dimenziójú tényező. Tehát a sebességi állandó logaritmusát a hőmérséklet reciproka függvényében ábrázolva egyenest kapunk, aminek a meredekségéből az  $E$  aktiválási energia kiszámítható. Már Polányi előtt is ismert volt, hogy az  $A$  tényező szoros kapcsolatban van a reaktáns molekulák ütközésével. Különösen – a némi egyszerűsítéssel – elemi reakcióknak is nevezhető folyamatok esetében, amikor a kiindulási anyagokból egyetlen lépésben keletkeznek a termékek, szembeűnő ez a kapcsolat. Az ilyen reakciók során a molekulák ütközésének számából jól megbecsülhető  $A$  értéke.

Polányit, akárcsak kortárs vagy később jövő tudóstársait, rendkívüli mértékben izgatta (és izgatja azóta is) az  $E$  tényező értelmezésének kérdése. Az említett Nature cikkben Polányi összefoglalja az ezzel kapcsolatos következtetéseit, és rámutat, hogy miképpen lehet az Arrhenius-féle összefüggést kapcsolatba hozni a termodinamikából ismert van't Hoff-ról elnevezett egyenlettel, amelyik az előző összefüggéshez hasonlóan exponenciális kapcsolatot állapít meg az egyensúlyi állandó hőmérsékletfüggésének leírásakor. Polányi és munkatársainak elmélete rendkívül elegánsan nemcsak a hőmérsékletfüggést, hanem a reakciósebesség más külső tényezőktől való függését is egységes keretben kezeli. Ennek köszönhetően egyszerűen értelmezhetővé vált a reakciók nyomásfüggése. Ez a hatás különösen a gázreakciók esetében jelentős. Adott  $T$  hőmérsékleten a sebességi állandó logaritmusának nyomás szerinti parciális deriváltja,  $\left(\frac{\partial \ln k}{\partial p}\right)_T$  egy új mennyiség,  $\Delta V^\ddagger$  bevezetésével értelmezhető ( $R$  az egyetemes gázállandó):

$$k \sim e^{-\frac{p\Delta V^\ddagger}{RT}} \quad \text{és} \quad \left(\frac{\partial \ln k}{\partial p}\right)_T = -\frac{\Delta V^\ddagger}{RT} \quad (2)$$

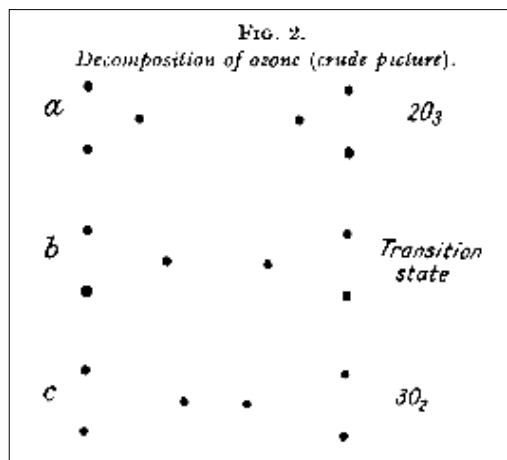
Az összefüggésben szereplő  $\Delta V^\ddagger$  aktiválási térfogat az aktivált komplex parciális moláris térfogata és a kiindulási anyagok parciális moláris térfogatainak összege közötti különbség. Vagyis a sebességi állandó logaritmusát a nyomás függvényében ábrázolva egyenest kapunk, aminek meredekségéből meghatározható, hogy az átmeneti állapot nagyobb vagy kisebb térfogatot foglal-e el, mint a kiindulási anyagok. Ez természetesen már fontos szerkezeti információt jelent.

Első látásra meglepőnek tűnhet, hogy az elektrokémiából jól ismert Tafel-egyenlet is pontosan illeszkedik a képbe, amennyiben az elektromos teret tekintjük külső változónak. A Tafel-egyenlet szerint az elektromos áram hatására bekövetkező kémiai átalakulásokban az áramsűrűség ( $i$ ) exponenciális függvénye a túlfeszültségnek ( $\epsilon$ ). Polányi eredeti jelölését követve ( $R$  itt is a gázállandót,  $F$  pedig a Faraday állandót jelenti):

$$i \sim e^{-\frac{\alpha F \epsilon}{RT}} \quad \text{és} \quad \log i = -\frac{\alpha F \epsilon}{RT} + \text{konst.}; \quad \alpha \sim 0.5 \quad (3)$$

Az 1-3 egyenletek formai hasonlósága a laikusok számára is szembeűnő. Viszont a formai hasonlóság önmagán túlmutató jelentősége számunkra az, hogy szemléletesen mutatja be Polányinak azt a képességét, hogy látszólag egymástól távoli jelenségeket tudott egyetlen elmélet keretében összefoglalni. Erre csakis úgy kerülhetett sor, hogy Polányi „megérezte” és jó érzéssel ragadta meg a kémiai jelenségek mélyebb értelmét és kapcsolatát. Természetesen a Nature folyóiratban megjelent összefoglaló cikknek számos előzménye volt, amelyekre jelen írás keretei között nem áll módunkban kitérni.

A reakciósebességi állandó különböző tényezőktől való függésének általános megfogalmazását az a kézenfekvő feltételezés teszi lehetővé, hogy amennyiben a reakció során egyetlen reaktáns(-pár) szempontjából figyeljük a történéseket és a kiindulási állapottól a termékekig vezető utat, létezik egy közbenső állapot a termékekhez vezető úton. A Polányi által átmeneti állapotnak (transition state) nevezett szakasz definiálása és vizsgálata napjainkban is a kémiai reakciók vizsgálatának központi kérdését jelenti. Az átmeneti állapotot bizonyos korlátozásokkal az egyensúlyi állapot leírására használt formalizmussal tudjuk leírni. A kiindulási és a végállapot közötti említett út leírására Polányi a reaktáns és termék atomok által kijelölt koordináta-rendszert javasolta. Tekintsük a következő példát: a három oxigénatomból álló ózonmolekulák ütközés eredményeképpen kétatomos oxigénmolekulákra bomlanak. Ennek a reakciónak az esetében átmeneti állapotként azt a pillanatot javasolta Polányi, amikor a speciális helyzetben ütköző ózonmolekulák egy-egy oxigénatomja közel kerül egymáshoz (Polányi 1937:629) (2. ábra).



2. ábra. Polányi eredeti ábrája az ózombomlás átmeneti állapotának szemléltetésére

Polányi rendkívüli felismerése volt, hogy az átmeneti állapot egyensúlyként való kezelhetőségének következményeként az egyensúlyi állapot bármely irányból, tehát a kiindulási anyagok felől (a...c) és a termékek felől is (c...a) egyaránt megközelíthető, valamint az, hogy az atomtávolságok koordinátarendszeréhez közvetlenül kapcsolható egy energiafüggvény. Ennek a függvénynek a maximumát tekinthetjük az átmeneti állapotnak. Az elmélet továbbfejlesztésének logikus következménye volt, hogy Polányi később az átmeneti állapotot rezonanciaként fogta fel (Polányi 1943:96). Polányinak ez a megfogalmazása is kiállta az idő próbáját. Napjainkban a modern technikák bevezetésével egyes esetekben már detektálni is lehet az átmeneti állapot vibrációs szabadsági fokai miatt létrejövő helyi maximumokat (Schatz 2000:1599).

Az átmeneti állapot leírásával kapcsolatos számos kérdés mind a mai napig nyitott maradt. Polányi az átmeneti állapot fogalmához a reakciókinetika fenomenologikus leírása során jutott el, és azt a szabadenergia-reakciókoordináta függvény maximumaként értelmezte. Ennek a megfogalmazásnak egyik fontos következménye volt az Evans-Polányi egyenlet, amit lineáris szabadenergia-összefüggésnek is neveznek (Evans-Polányi 1936:1333). Az Evans-Polányi egyenlet azt a tapasztalatot juttatja kifejezésre, hogy a nagyobb energiaváltozással járó reakciók – általában – gyorsabban játszódnak le.

Több mint fél évszázad távlatából nehéz felmérni, hogy részleteiket tekintve milyen harcok és viták folytak az egyes kutatók és iskolák között a természet leírására alkalmazott módszerek elismertetésért. Azt azonban leszögezhetjük, hogy a tudomány szinte minden területén napjainkban is folynak hasonló viták, és vélhetően számos példát találunk majd rá a jövőben is. Akár a médiaszereplésekhez is hasonlíthatjuk ezeket a legkülönbözőbb indítékok motiválta és változatos

eszközökkel megvívott harcokat. És persze azt sem szabad elfelednünk, hogy mára a tudomány is tömegeket befolyásoló médiatényezővé lépett elő.

Álljon itt mindössze egyetlen példa a rendkívül szövevényes szerkezetű tudományos viták szemléltetésére: Polányi és Evans az 1937-ben közösen publikált cikkükben a termodinamikai változók reakciókinetikai alkalmazásával kapcsolatban – az egyik lábjegyzeten belül – provokatívan jegyzik meg a következőket: „*Nem tudjuk, hogy ezt az elképzelést elfogadja-e Moelwyn-Hughes, mivel nem reagált a reakciósebesség nyomásfüggését leíró munkánkra.*” (Evans-Polanyi 1937:451).

Azt mindenképpen elmondhatjuk, hogy Polányi Mihály mint annyi más területen, a reakciókinetikában is alapvető meglátásokkal gazdagította tudásunkat. Azzal, hogy felismerte a termodinamika és a reakciókinetika összekapcsolásának lehetőségét, jelentős részt vállalt a modern reakciókinetika megalapozásában. Cikkei több mint fél évszázad távolságából is lenyűgözik az olvasót. A szemléletes példák, a világos matematikai levezetések, a mélyreható következtetések felismerése egy igazi polihisztor gondolatainak megannyi csillogása. A korszak nehézségei ellenére is kimagasló életműve a magyar tudósok világszínvonalú kutatásokra való alkalmasságát bizonyítja, és egyaránt tanulságos mind a mai, mind pedig az eljövendő tudósnemzedékek számára.

Polányi tudománypolitikára vonatkozó megállapításainak akár napi aktualitására is felfigyelhetünk. A kutatással kapcsolatos napi döntéseket ugyanis nem képes kezelni vagy megtervezni egy mégannyira „hatalmas” központi tudományszervező hatóság sem, amilyen az ő korában a szovjet tudomány felsőbbbségét deklaráló, központból irányított hierarchikus pártszervek működése volt. Ismeretes, hogy hasonló szerepet töltöttek volna be Angliában a bevezetni kívánt központilag tervezett tudományt irányító testületek is, amelyek felállításának tervét Polányi számos írásában éles hangon bírálta (Polanyi 1941:428, Scott 1983:302). Kémikusi és filozófusi munkássága ma is inspirálja a tudomány művelőit. Sok esetben ez észrevétlenül, Polányi nevének említése nélkül történik, mivel felismerései és eredményei mára tudományszemléletünk alakítóivá váltak, sőt mindennapi életünkbe is beépültek.

## IRODALOM

- Bényei A. (2003). Polányi Mihály kémikus munkássága mai szemmel – Találkozások. *Polanyiana*, Vol. 12. 2003/1-2, 91-98.
- Evans, M. G.; Polanyi, M. (1936). Further Considerations on the Thermodynamics of Chemical Equilibria and Reaction Rates. *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 32, 1333-1360.
- Evans, M. G.; Polanyi, M. (1937). On the Introduction of Thermodynamic Variables into Reaction Kinetics. *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 33, 448-452.
- Eyring, H; Polanyi, M. (1931) On Simple Gas Reactions. *Z. Phys. Chem.*, Vol. B12, 279-311.



- Frank T. (2003). Polányi Mihály Berlinben. *Polanyiana*, Vol 12. 2003/1-2, 117-133.
- Polanyi, M.; Eyring, H. (1930). On the calculation of Energy of Activation. *Naturwissenschaften*, Vol. 18, 914-915.
- Polanyi, M. (1937). The Transition State in Chemical Kinetics. *Nature*, Vol. 139, 575-576.
- Polanyi, M. (1937). The Transition State in Chemical Reactions. *J Chem Soc.*, 629-635.
- Polanyi, M. (1941). The Growth of Thought in Society. *Economica*, Vol 8, 428-456.
- Polanyi, M. (1943). Resonance and Chemical Reactivity. *Nature*, Vol. 151, 96-98.
- Polanyi, M. (1962). My Time with X-rays and Crystals, In: Ewald (Ed.), *Fifty Years of X-ray Diffraction*. Utrecht: Oosthoek.
- Polanyi, M. (1963). The Potential Theory of Adsorption. *Science*, Vol. 141, 1010-1013.
- Polanyi, M. (1969). *Knowing and Being*. London: Routledge & Kegan Paul.
- Schatz, G. C. (2000). Reaction Dynamics: Detecting Resonances. *Science*, Vol. 288, 1599-1600.
- Scott, W. T. (1983). Michael Polanyi's Creativity in Chemistry. In Aris R. – Davis H. T. – Stouewer R. H. (Eds.), *Springs of Scientific Creativity*. Minneapolis: University of Minnesota Press.