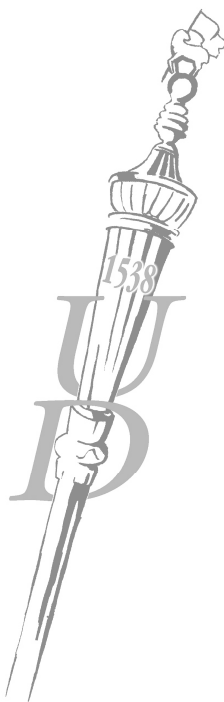


**Egyetemi Doktori (PhD) értekezés tézisei**

**Katalitikusan aktív Ru(II)-hidridek vizsgálata vizes  
közegben**

**Papp Gábor**

Témavezető: Dr. Joó Ferenc egyetemi tanár



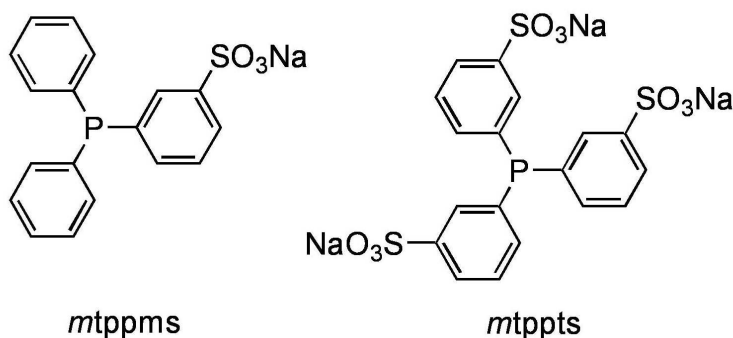
Debreceni Egyetem  
Kémiai Tudományok Doktori Iskola  
Debrecen, 2009



## I. Bevezetés, célkitűzések

A homogén katalízis előnyei közé elsősorban a katalizátorok jelentős aktivitása és szelektivitása tartozik. Az ipar számára is alkalmazhatóvá tételük legfőbb akadálya az, hogy a legtöbb esetben a katalizátor nehezen választható el a termékektől illetve a szubsztrátumtól.

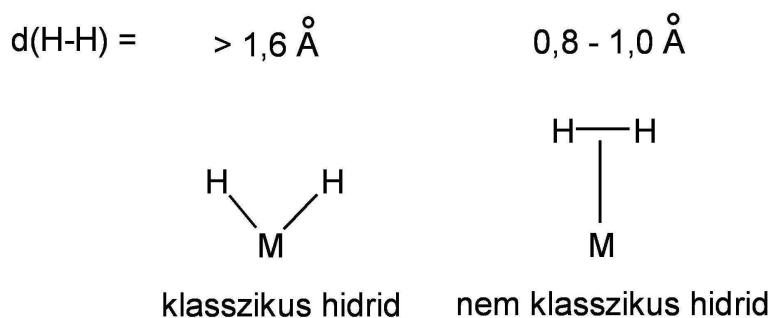
Nagyobb sikereket értek el azokban az esetekben, amikor két, egymással nem elegyedő oldószert alkalmaztak. Az egyik oldószer a katalizátort, a másik pedig a szubsztrátumot illetve a reakció termékeket tartalmazta. A legtöbb átalakítandó szubsztrátum szerves vegyület, melyek többsége csak szerves oldószerekben oldódik, így ez képezheti a szerves fázist, a másik fázis pedig a katalizátor vizes oldata lehet. Ehhez természetesen a katalizátort kellett vízoldhatóvá tenni. Ezt a legkönnyebben a ligandum hidrofíliájának növelésével lehet elérni, amelynek általános módja a szulfonálás. Az így kapott vegyületek, mint például a szulfonált tercier foszfinok jó vízoldékonysággal rendelkeznek, ezáltal átmenetifémekkel alkotott komplexeik is oldódnak vízben. Az iparban elsősorban a háromszorosan szulfonált trifenil-foszfit (*mtppts*) alkalmazzák, azonban modellkísérletekhez illetve laboratóriumi munkában a leggyakrabban a monoszulfonált trifenil-foszfit (*mtpms*) használják.



**1. ábra:** Vízoldható foszfin származékok.

A Debreceni Egyetem Fizikai Kémia Tanszékén a *mtpms* felhasználásával már számos ruténium(II)- és ródium(I)-komplexet állítottak elő és elsősorban vízzoldható szubsztrátumok hidrogénezésében illetve vizes szerves kétfázisú rendszerekben modellvegyületek (pl.: fahéjaldehid) hidrogénezésében vizsgálták őket.

Kimutatták, hogy a katalitikus folyamatokban a katalitikusan aktív köztitermékek általában valamilyen átmenetifém-hidridek, amelyek a körülmények megfelelő változtatásával egymásba reverzibilisen átalakíthatók. Ezen folyamatok segítségével számos esetben a reakció szelektivitása is megváltozik, amely fontos lehet ipari alkalmazások terén is.



**2. ábra:** Átmenetifém hidridek csoportosítása.

A Ru(II) vízzoldható foszfinkomplexei különféle hidrogénforrásokkal ( $\text{H}_2$ , szilánok,  $\text{HCOONa}/\text{H}_2\text{O}$ ) reagálva a körülményektől (oldószer,  $\text{H}_2$ -nyomás, pH, klorid-koncentráció) rendkívül változatos hidrido származékokat képeznek és döntően befolyásolják a katalizált folyamatok sebességét és szelektivitását. Doktori munkám céljából azt tűztem ki, hogy ezeket a Ru(II)-hidrideket azonosítsam, meghatározzam oldatfázisban mutatott szerkezetüket és megállapítsam katalitikus folyamatokban játszott szerepüket.

## II. Alkalmazott vizsgálati módszerek

Az általam használt és előállított komplexek szerkezetének meghatározására szinte kizárólag NMR-technikát alkalmaztam.

Az NMR vizsgálatok ( $^1\text{H}$  360 MHz,  $^{13}\text{C}$  90 MHz, és  $^{31}\text{P}$  146 MHz) BRUKER AV 360, AC 200, DRX 400 illetve DRX 600 készülékeken történtek. Mivel a képződő, elsősorban hidrido komplexek oldatban –gyakran csak magasabb hidrogén nyomás alatt– képződnek, ezek szerkezet-meghatározásában is a különböző NMR mérés technikákra támaszkodhattam. A közepes nyomású (20-100 bar) NMR-méréseket a Lausanne-i Szövetségi Műszaki Egyetemen (EPFL) végeztem zafír NMR csőben. A kis nyomás (2-8 bar) alatt végzett NMR-méréseket az erre alkalmas úgynevezett „Wilmad<sup>®</sup> quick pressure valve”-NMR csőben végeztem.

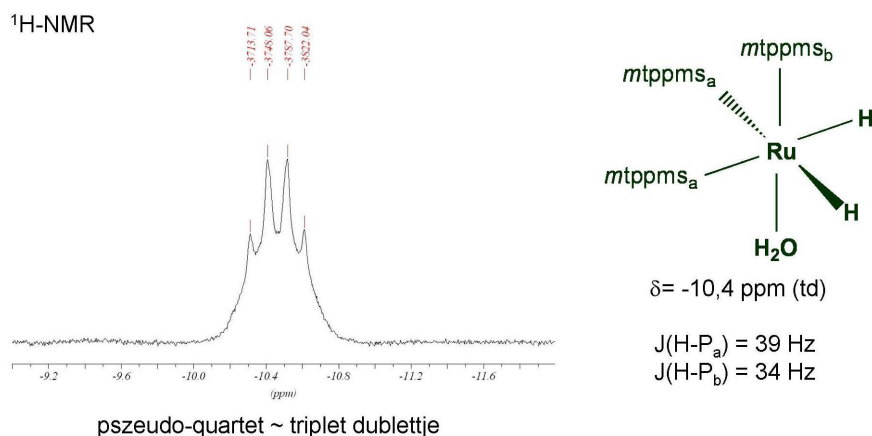
A hidrogénezési és hidroszililezési reakciók termékelegyét elsősorban gázkromatográfia alkalmazásával analizáltam, amelyhez egy lángionizációs detektorral felszerelt HEWLETT-PACKARD 5890 Series II gázkromatográfot használtam. Az elválasztást CARBOWAX 30M kapilláris kolonnán valósítottam meg.

### III. Új tudományos eredmények

1. Meghatároztam a lúgos oldatban atmoszférikus hidrogén nyomás alatt képződő *cisz*-[RuH<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)(mtppps)<sub>3</sub>] szerkezetét.

Joó F. és munkatársai saját mérések alapján és irodalmi analógiára támaszkodva a [{RuCl<sub>2</sub>(mtppps)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>}-ből foszfin feleslegben, lúgos közegben képződő hidridkomplextet *cisz*-[RuH<sub>2</sub>(mtppps)<sub>4</sub>]-ként azonosították. Számos kísérleti eredmény és elméleti számítás is megkérdőjelezte négy koordinált foszfin jelenlétét az adott körülmények között képződő hidridben. Kovács G. és munkatársai által elvégzett elméleti számítások a hasonló körülmények között képződő katalitikusan aktív hidrid szerkezetére a három koordinált foszfint valószínűsítik.

Ezen tapasztalatok kísérletes igazolására NMR-titrálást végeztem az adott rendszerben. Ez azt mutatta hogy ha a Ru:mtppps arányt 1:3-ra állítjuk, akkor gyakorlatilag nincs szabad foszfin az oldatban. Ha az arányt 1:4-re majd 1:5-re állítjuk akkor rendre a megfelelő mennyiségű (1 illetve 2) ekvivalens szabad foszfin jelenik meg a spektrumokon. <sup>1</sup>H- és <sup>31</sup>P-NMR méréseket felhasználva a dihidrid szerkezete a 3. ábrán látható.

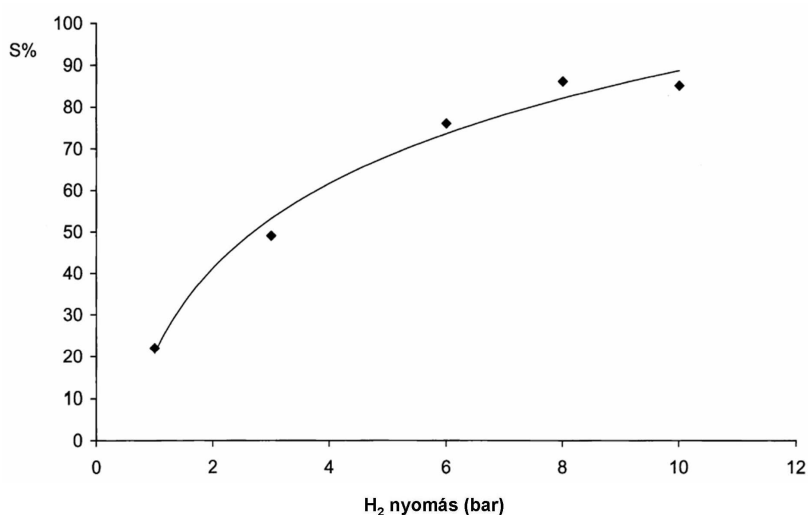


3. ábra: A *cisz*-[RuH<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)(mtppps)<sub>3</sub>] <sup>1</sup>H-NMR spektrumának részlete és a komplex szerkezete. (1 bar H<sub>2</sub> alatt, [Ru] = 0,03M, 10 v/v% CD<sub>3</sub>OD/H<sub>2</sub>O)

2. Megállapítottam, hogy a fahéjaldehid vizes-szerves kétfázisú redukciójának szelektivitása megváltozik nagyobb hidrogén nyomás hatására [ $\text{RuCl}_2(\text{mtpms})_2$ ] katalizátort alkalmazva.

A fahéjaldehid amely C=C és C=O telíthető kötések is tartalmaz regioszelektív hidrogénezése vizes-szerves kétfázisú rendszerekben fontos modellreakció. A savas oldatban képződő monohidridek kisebb aktivitással a C=C kettős kötést redukálják, míg a bázikus oldatban képződő dihidrid a C=O kettős kötés redukációjában szelektív.

Elvégeztem a fahéjaldehid hidrogénezését nagyobb hidrogén nyomás alkalmazásával vizes-szerves kétfázisú rendszerben, savas oldatban. Az eredményt az 4. ábra mutatja.



**4. ábra:** A szelektivitás változása a hidrogén nyomással fahéjaldehid hidrogénezése esetén,  $\text{pH} = 3,04$ .

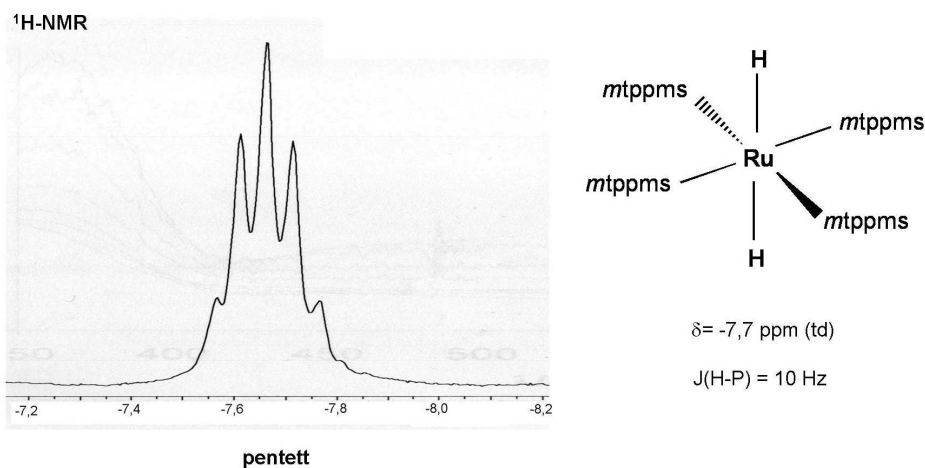
$$[S\% = 100 \times \{(\text{alkohol-aldehyd}) / (\text{alkohol} + \text{aldehyd})\}]$$

A H<sub>2</sub>-nyomás növelésével tehát a szelektivitás megváltozik, vagyis a C=C kötés redukciója helyett a C=O kötés hidrogéneződik. Nyomás hatására bekövetkező kemoszelektivitás váltásra eddig az irodalomban még nem volt példa.

3. NMR spektroszkópiával meghatároztam a savas oldatokban nagyobb hidrogén nyomás alatt képződő *transz*-[RuH<sub>2</sub>(mtppps)<sub>4</sub>] komplex szerkezetét.

A fahéjaldehid redukciójának szelektivitás váltása, valamint számos –irodalomban megjelent– nyomás alatt végzett NMR mérés arra utalt, hogy a [{RuCl<sub>2</sub>(mtppps)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>] vizes oldatában nagyobb nyomású hidrogénnel másfajta hidridféleségek képződhetnek, mint amiket atmoszférikus nyomás alatt már ismerünk.

<sup>1</sup>H- illetve <sup>31</sup>P-NMR méréseket végeztem kis (2-8 bar) és közepes (10-100 bar) hidrogén nyomás alatt. (5. ábra)



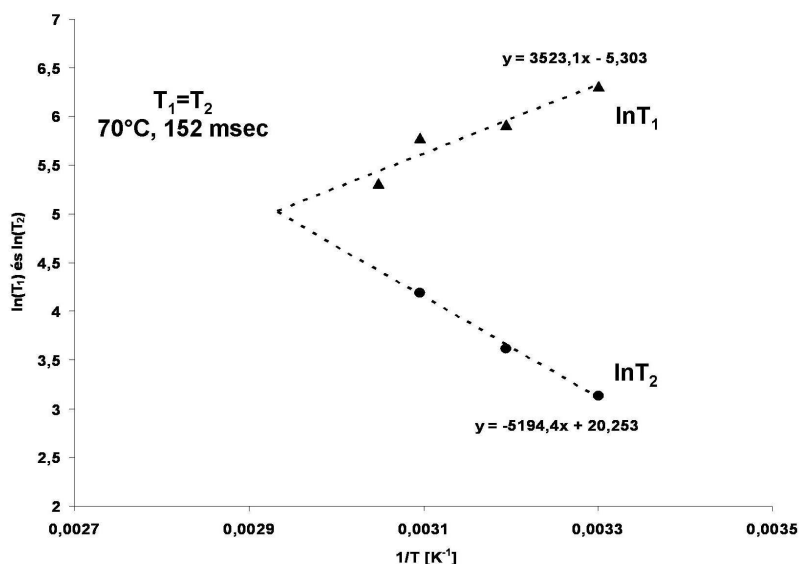
**5. ábra:** A *transz*-[RuH<sub>2</sub>(mtppps)<sub>4</sub>] szerkezete és <sup>1</sup>H-NMR spektruma 100 bar H<sub>2</sub> alatt. ([Ru] = 0,03M, 10 v/v% CD<sub>3</sub>OD/H<sub>2</sub>O)

A jel egy szabályos pentett, ami a koordinációs szférában 4 ekvivalens foszfint jelent, továbbá az <sup>1</sup>H-NMR spektrumok integrálja azt mutatta, hogy Ru-onként két hidrid van az oldatban. Oktaéderez térszerkezetet figyelembe véve ez csak abban az esetben képzelhető el, ha a 4 foszfin egy síkban van, míg egy-egy hidrid e sík alatt illetve felett. Szintén ekvivalens foszfinokat feltételez a <sup>31</sup>P-NMR spektrum is ahol a komplexhez tartozó jel egy relatíve széles szinglett jel 57,2 ppm-nél, amely proton lecsatolásra keskenyedik.

4. Meghatároztam a  $\text{transz-}[\text{RuH}_2(\text{mtppps})_4]$  komplexhez tartozó  $T_{1(\text{min})}$  értéket, amely 152 ms-nak adódott.

Irodalomból ismert, hogy az átmenetifém polihidridek esetében a transzverzális és longitudinális relaxációs ( $T_1$ ,  $T_2$ ) idők hőmérséklet-függésének meghatározásával eldönthető, hogy az adott hidrid „klasszikus” (M-H) vagy „nem klasszikus” (M- $\eta^2$ -H<sub>2</sub>).

Mindezek alapján megmértem különböző hőmérsékleteken a relaxációs időket, majd ezeket az eredményeket a megfelelő linearizált formában ábrázoltam és az egyenesek metszéspontjából kiszámoltam a jellemző  $T_{1(\text{min})}$  értéket (6. ábra).



6. ábra:  $T_{1(\text{min})} [T_1=T_2]$  meghatározás  $\text{transz-}[\text{RuH}_2(\text{mtppps})_4]$ . (savas oldatban  $\text{pH}=3,0$ )

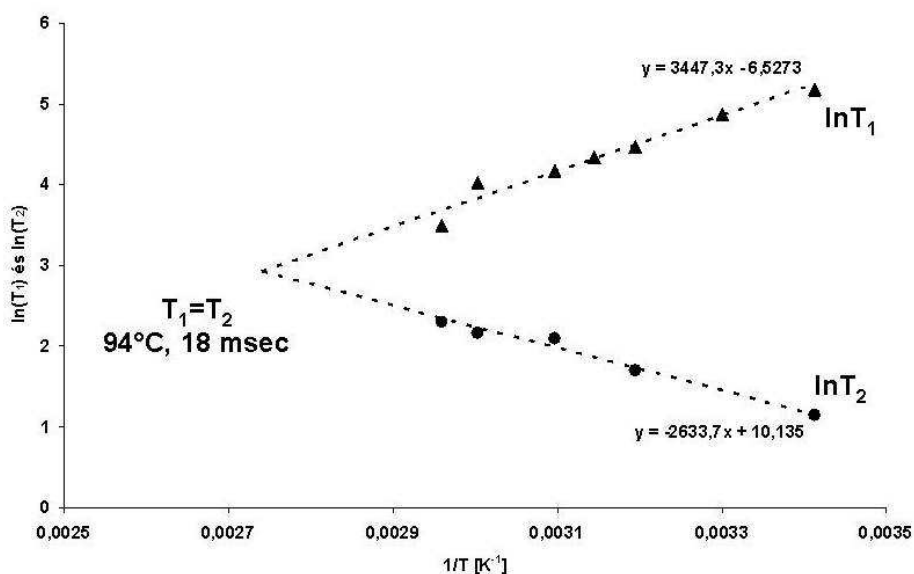
A  $T_{1(\text{min})}$  értéke 152 ms-nak adódott, ami megfelel a klasszikus hidrid kritériumnak, vagyis a komplexben csak klasszikus fém-hidrid kötés van. Ez egy további bizonyítéka annak, hogy savas oldatokban nagyobb H<sub>2</sub>-nyomás (már 5-6 bar) alatt a  $\text{transz-}[\text{RuH}_2(\text{mtppps})_4]$  komplex képződik.

5. Megállapítottam, hogy gyengén bázikus oldatokban a  $[RuH_2(H_2)(mtppps)_3]$  komplex képződik magasabb hidrogén nyomás alatt.

Az atmoszférikus nyomáson képződő különböző hidridek kialakulásának pH-függéséből kiindulva logikusnak tűnt, hogy különböző pH-kon magasabb nyomás alatt is különböző hidridek képződhetnek.

Általánosan alkalmazott körülmények között (40-50°C, pH ~ 8, 100 bar  $H_2$ ) mért  $^1H$ - illetve  $^{31}P$ -NMR spektrumokból kiderült, hogy egy új hidrid képződik. Azonban az új komplexhez tartozó jelek multiplicitása nem volt mérhető, viszont az NMR integrál értékekből arra lehetett következtetni, hogy Ru-onként 4 hidrid és 3 foszfin van a koordinációs szférában.

Elvégeztem ebben az esetben is a relaxációs idők mérését különböző hőmérsékleteken, majd ezeket a megfelelő formában ábrázoltam (7. ábra).



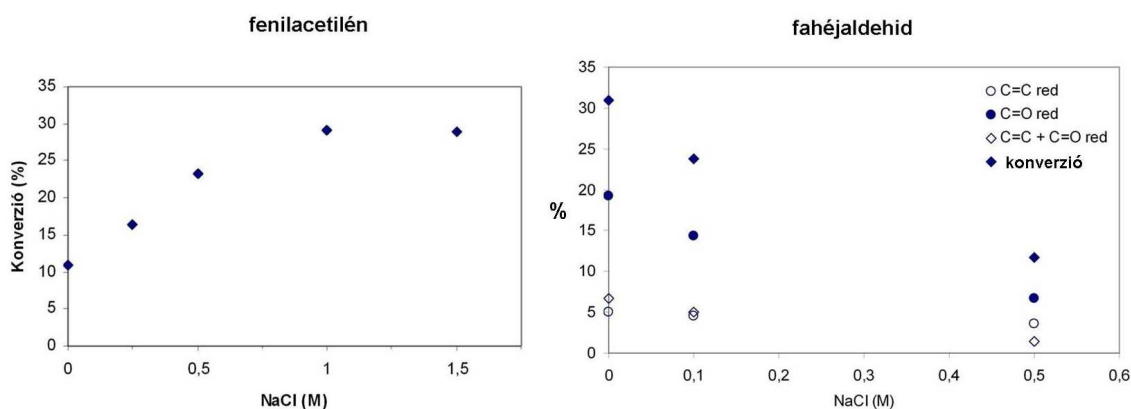
7. ábra:  $T_{1(min)} [T_1=T_2]$  meghatározása  $[Ru(H_2)H_2(mtppps)_3]$ . (lúgos oldatban pH=8,0)

Ebben az esetben a  $T_{1(min)}$  értéke 18 ms-nak adódott. Ez jó egyezésben van a nem szulfonált foszfit tartalmazó analóg komplex  $[RuH_2(H_2)(PPh_3)_3]$  esetében irodalomból már ismert  $T_{1(min)}$  értékkel (30 ms).

Csak néhány példa van eddig vizes közegben kimutatott molekuláris hidrogént tartalmazó komplexre, így az elsők között vagyunk akiknek sikerült vizes közegben meghatározni –és NMR módszerrel bizonyítani– hasonló komplex képződését.

6. Megállapítottam, hogy  $[RuHCl(CO)(mtpms)_3]$  komplex katalizátor alkalmazásával végzett vizes-szerves kétfázisú hidrogénezési reakciókban a klorid disszociációjának jelentős hatása van.

Ismeretes, hogy vizes oldatban a  $[RuHCl(CO)(mtpms)_3]$   $Cl^-$ -t veszít és  $[RuH(H_2O)(CO)(mtpms)_3]$  képződik. Fenilacetilén és fahéjaldehid hidrogénezését vizsgáltam különböző klorid koncentrációk mellett vizes-szerves kétfázisú rendszerben  $[RuHCl(CO)(mtpms)_3]$  katalizátorral. (Fenilacetilén esetében termékként mindig csak a sztírolt kaptam.) Az eredményeket a 8. ábra mutatja.



**8. ábra:** A klorid koncentráció hatása a fenilacetilén és fahéjaldehid hidrogénezésére.

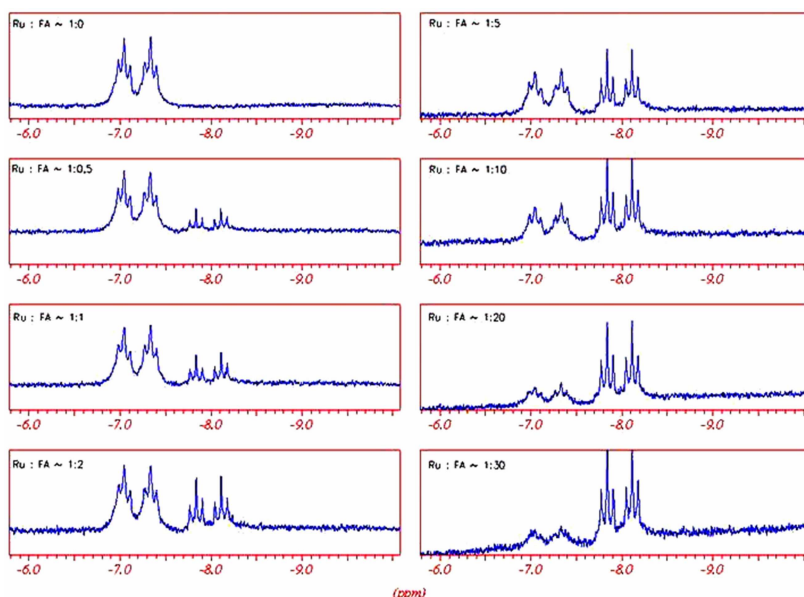
( $[Ru] = 0,01 M$ ,  $[szub] = 0,5 M$ ,  $p(H_2) = 1 bar$ ,  $T = 333K$ ,  $t = 2h$ ,  $1ml$  puffer  $pH=7,0$  /  $1ml$  toluol)

A kapott eredmények azt mutatják, hogy a klorid koncentrációja ellentétesen hat a két reakcióra, vagyis fahéjaldehid esetében a komplexből való klorid

disszociáció visszaszorítása növeli a katalizátor aktivitását, míg fenilacetilén esetén gátolja.

7. NMR módszerrel bizonyítottam, hogy mind a fahéjaldehid, mind pedig a fenilacetilén hidrogénezése esetében az ellentétesnek mutatkozó klorid hatás a szubsztrátumok koordinációjával magyarázható.

A 9. ábrán bemutatott  $^1\text{H}$ -NMR spektroszkópiás méréssel követtem a  $[\text{RuHCl}(\text{CO})(\text{mtppps})_3]$ -komplex spektrális tulajdonságainak változását fahéjaldehiddel történő titrálás közben. Azt tapasztaltam, hogy fahéjaldehid adagolására egy új hidrid jel jelenik meg a spektrumban.



**9. ábra:**  $[\text{RuHCl}(\text{CO})(\text{mtppps})_3]$  reakciója fahéjaldehiddel.

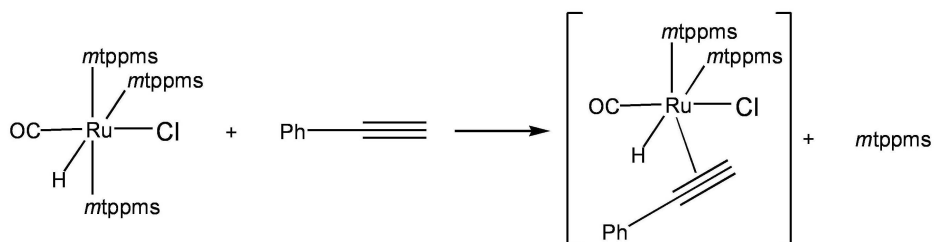
$^1\text{H}$  NMR spektrumok; Ru =  $[\text{RuHCl}(\text{CO})(\text{mtppps})_3]$ , FA = fahéjaldehid

$[\text{Ru}] = 0,025 \text{ M}$   $T = 298 \text{ K}$ , 0,6 ml oldószer (50 v/v%  $\text{CD}_3\text{OD}/\text{H}_2\text{O}$ )

A 9. ábrán látható spektrumok és a  $^{31}\text{P}$ -NMR mérések is azt mutatják, hogy a fahéjaldehid a  $\text{Cl}^-$  illetve a  $\text{H}_2\text{O}$  helyére lép be. Az új átmeneti komplex feltételezhetően belső átrendeződés és a molekuláris hidrogénnel történő reakció után adja a terméket. Ezen köztitermék kialakulását pedig az

egyensúlyi reakció miatt a klorid koncentráció növelése gátolja, így csökken a konverzió mértéke is.

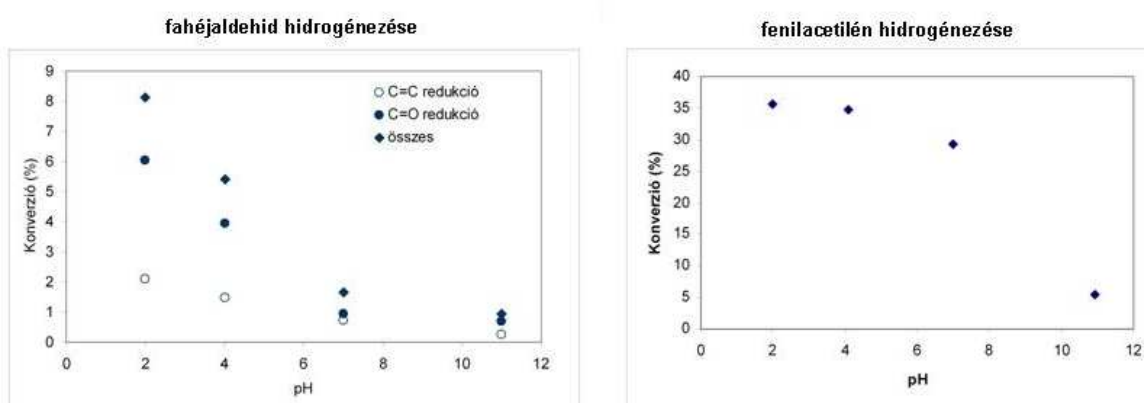
Ezzel ellentétben a fenilacetilén (szintén NMR mérések alapján) a 10. ábra szerint koordinál a Ru-hoz.



**10. ábra:** Fenilacetilén hidrogénezésében szerepet játszó átmeneti komplex kialakulása.

Ennek az átmeneti komplexnek a kialakulását azonban a klorid-koncentráció növelése elősegíti azáltal, hogy növeli a köztitermék stabilitását.

8. Megállapítottam, hogy a fahéjaldehid és a fenilacetilén vizes-szerves kétfázisú hidrogénezésében is a pH-nak jelentős hatása van, amelynek háttérében az alkalmazott katalizátor  $[RuH(H_2O)(CO)(mtpms)_3]$  magasabb pH-n bekövetkező deprotonálódása áll.



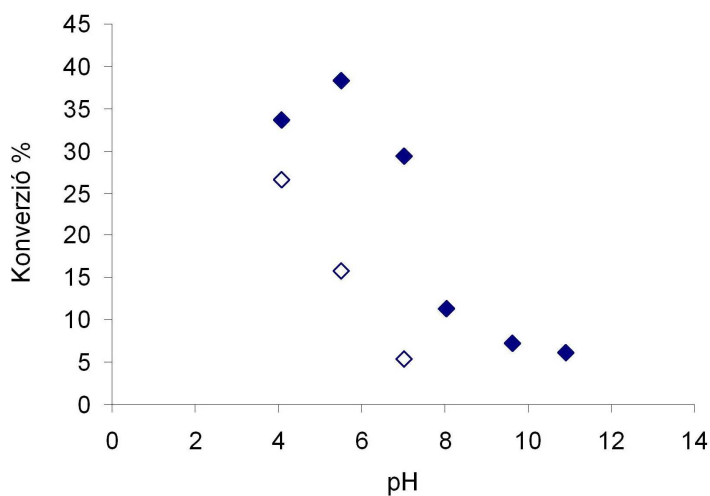
**11. ábra:** pH hatása a fahéjaldehid és a fenilacetilén hidrogénezésére.

$[Ru] = 0,01M$ ,  $[szub] = 0,5 M$ ,  $p(H_2) = 1 \text{ bar}$ ,  $T = 333K$ ,  $t = 2h$ ,  $1ml$  puffer/ $1ml$  toluol

A 11. ábrán látszik, hogy mindkét esetben az alkalmazott pH csökkenti az elért konverzió értékét. Ez a jelenség mindkét esetben azzal magyarázható, hogy nagyobb pH-n a  $[\text{RuH}(\text{H}_2\text{O})(\text{CO})(\text{mtppps})_3]$  komplex deprotonálódik és a képződő  $[\text{RuH}(\text{OH})(\text{CO})(\text{mtppps})_3]$  már nem aktív katalizátor ebben a reakcióban.

9. *Kimutattam, hogy fahéjaldehid  $[\text{RuHCl}(\text{CO})(\text{mtppps})_3]$  komplex katalizátorral történő vizes-szerves kétfázisú hidroszililezésében mind a pH-nak mind pedig a klorid koncentrációnak jelentős hatása van.*

Fahéjaldehid hidroszililezését végeztem  $\text{SiHMe}_2\text{Ph}$ -nal vizes-szerves kétfázisú rendszerben, különböző pH és klorid koncentráció alkalmazása mellett  $[\text{RuHCl}(\text{CO})(\text{mtppps})_3]$  katalizátorral. Az eredményeket a 12. ábra mutatja.



**12. ábra:** Fahéjaldehid hidroszililezésének pH függése.

$[\text{kat}] = 0,01 \text{ M}$ ,  $[\text{szub}] = 1 \text{ M}$ ,  $T = 333 \text{ K}$ ,  $t = 2 \text{ h}$ , Ar, 1ml foszfát puffer /1 ml toluol,

◆: szililezett fahéjaldehid + fahéjalkohol (Cl<sup>-</sup> mentes), ◇: szililezett fahéjaldehid + fahéjalkohol ([Cl<sup>-</sup>] = 1 M)

A konverzió drasztikus csökkenését tapasztaltam kloridos rendszerben növelve a pH-t, míg kloridmentes rendszerben a konverzió maximum görbe szerint változik.

A katalitikusan aktív hidridek összetételének vizsgálatára NMR méréseket végeztem, amelyeket összefoglalva az 1. táblázat tartalmaz.

pH	2,1	7,5	11,2
[Cl <sup>-</sup> ] / M			
0,021	[RuH(H <sub>2</sub> O)(CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~100%	[RuH <sub>2</sub> (CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~99%	[RuH <sub>2</sub> (CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~99%
0,521	[RuHCl(CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~100%	[RuH <sub>2</sub> (CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~58% [RuHCl(CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~42%	[RuH <sub>2</sub> (CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~99%
1,021		[RuH <sub>2</sub> (CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~28% [RuHCl(CO)(mtppps) <sub>3</sub> ] ~72%	

1. táblázat: Különböző hidridek eloszlása a [RuHCl(CO)(mtppps)<sub>3</sub>] – SiHMe<sub>2</sub>Ph vizes oldataiban.

A katalitikus eredményeket összevetve az NMR mérésekkel belátható, hogy a reakcióban egyedül a [Ru-H<sub>2</sub>O] komplex tekinthető aktívnek és arányának csökkenésével a konverzió minden esetben csökken.

10. Meghatároztam a fahéjaldehid hidrogénátviteli reakcióban HCOONa-ról történő egyfázisú hidrogénezésének az optimális körülményeit víz/izopropanol oldószerkeletben [{RuCl<sub>2</sub>(mtppps)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>] katalizátor jelenlétében.

Fahéjaldehid redukcióját vizsgáltam enyhe körülmények (30°C) között egyfázisú hidrogénátviteli reakcióban [{RuCl<sub>2</sub>(mtppps)<sub>2</sub>]<sub>2</sub>] komplex katalizátor alkalmazása mellett.

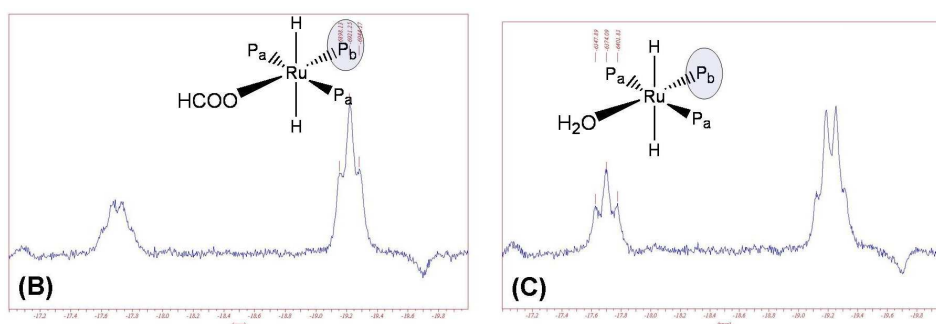
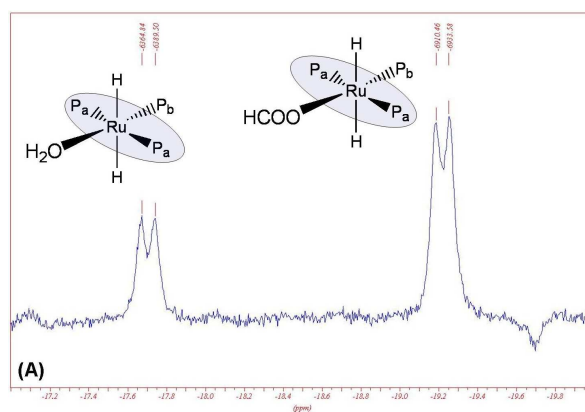
Megállapítottam, hogy a reakció már igen enyhe körülmények között is 30°C-on, 2 óra alatt 100%-ban 100%-os szelektivitással adja a megfelelő

telítetlen alkoholt. Hidrogén forrásként különböző arányban összekevert HCOOH/HCOONa-ot használva a tiszta HCOONa adódott a legjobbnak, míg tiszta hangyasavban gyakorlatilag nincs reakció. A konverzió értéke a  $[\text{Ru}]:[\text{mtpms}] = 1:6$  értéknél éri el a maximumot, míg a  $[\text{szub.}]:[\text{kat.}] = 200:1$  körül adja a legmagasabb konverziót. Ennél magasabb szubsztrátum felesleg alkalmazása drasztikusan csökkenti a konverzió mértékét.

*11. Klasszikus 1D és 2D NMR-spektroszkópiás módszerekkel valamint szelektív lecsatolási technikák alkalmazásával bizonyítottam a *transz*- $[\text{RuH}_2(\text{HCOO})(\text{mtpms})_3]$  komplex szerkezetét.*

NMR méréseket végeztem annak kiderítésére, hogy a HCOONa /  $[\{\text{RuCl}_2(\text{mtpms})_2\}_2] / \text{H}_2\text{O} / i\text{-PrOH}$  rendszerben képződik-e valamilyen új katalitikusan aktív Ru-hidrid.

Klasszikus  $^1\text{H}$ -,  $^{31}\text{P}$ -,  $^{13}\text{C}$ -NMR (1D) valamint  $^{31}\text{P}$ - $^{31}\text{P}$  COSY (2D) illetve jelszelektív  $^1\text{H}\{,x'' \text{ ppm P}\}$ -NMR spektrumok (13. ábra) mérésével bizonyítottam, hogy az oldatban a formiát koncentrációtól függően képződik a *transz*- $[\text{RuH}_2(\text{HCOO})(\text{mtpms})_3]$  és a *transz*- $[\text{RuH}_2(\text{H}_2\text{O})(\text{mtpms})_3]$ .



**13. ábra:** Szelektív  $P$ -lecsatolt  $^1\text{H}$ -NMR spektrumok;  $[\text{Ru}] = 0,042 \text{ M}$ ,  $[\text{mtpms}] = 0,17 \text{ M}$ ,  $[\text{HCOONa}] = 0,84 \text{ M}$ ;  $0,6 \text{ ml H}_2\text{O}/i\text{-PrOH} = 1/1$ ;  $\text{D}_2\text{O}$  kapilláris (A:  $^1\text{H}\{^31\text{P} \sim 44 \text{ ppm}\}$ ; B:  $^1\text{H-NMR}\{^31\text{P} \sim 79 \text{ ppm}\}$ ; C:  $^1\text{H-NMR}\{^31\text{P} \sim 77 \text{ ppm}\}$ )

Az NMR mérésekből továbbá az is következik, hogy a hidrogénátviteli reakciókban a katalitikusan aktív hidrid a *transz*- $[\text{RuH}_2(\text{HCOO})(\text{mtpms})_3]$ , mivel a katalitikus reakció körülményei között (ahol általában 200-szoros a  $\text{HCOONa}$  feleslege) gyakorlatilag csak ez a hidrid van jelen.