



ارزیابی بازیافت گاز از رسوبات متخلخل حاوی هیدرات گاز طبیعی

شهاب تهرانی، پژوهشکده ازدیاد برداشت

مجتبی مصاحب، مهدی زلفی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده

کاهش منابع هیدروکربوری معمول و افزایش تقاضای انرژی، باعث گرایش به توسعه منابع گازی غیر معمول شده است. از اینرو، فعالیت‌های تحقیقاتی برای تولید گاز از رسوبات هیدرات گاز طبیعی گسترش یافته است. اگرچه مخازن هیدرات گاز طبیعی نسبت به مخازن گازی معمول در حال حاضر به عنوان منابع اقتصادی تولید گاز، توسعه نیافته‌اند، اما این احتمال وجود دارد که در آینده نه‌چندان دور به منابع ارزشمندی برای تأمین انرژی تبدیل شوند. هیدرات‌های گازی در شرایط مختلف زمین‌شناسی مانند رسوبات بستر دریا و برخی مناطق قطبی وجود دارند.

در کشور مادر دریای عمان، مخازن هیدرات گازی‌ای وجود دارد که در فاز اکتشاف قرار دارند و عملیات تولید در آن‌ها صورت پذیرفته است. هم‌اکنون، متخصصان کشور در حال بررسی ابعاد، میزان ذخیره و سایر مسائل مربوط به اکتشاف این مخازن می‌باشند که امید است در سال‌های آتی انجام این فعالیت‌ها به تولید از این ذخایر با ارزش منجر شود.

در این تحقیق شرایط و عوامل مؤثر بر بازیافت گاز از مخازن هیدرات گاز طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. رفتار تولید در مخازن هیدرات گازی با رفتار تولید مخازن گازی معمولی متفاوت است. نرخ دبی گاز در مخازن گازی بیشتر از مخازن هیدرات گازی است، اما دوره تثبیت تولید در آن کوتاه‌تر است. با افزایش دبی گاز، به‌طور کلی تولید آب در مخازن هیدرات گازی بیشتر از مخازن گازی خواهد بود. کاهش فشار، تحریک گرمایی و تزریق بازدارنده، سه روش شناخته شده برای تولید گاز از مخازن هیدرات گاز طبیعی به‌شمار می‌رود. روش دیگر که روشی جدید به حساب می‌آید، ایجاد فرآیند جایگزینی متان-دی‌اکسید کربن درون رسوبات حاوی هیدرات گازی است. از میان این روش‌ها، کاهش فشار از نظر مصرف انرژی بهینه‌تر است.

واژگان کلیدی: هیدرات گازی، ارزیابی تولید، مخازن گازی، گاز طبیعی، تجزیه هیدرات

مقدمه

وجود دارد که آب متحرک است ولی گاز آزاد وجود ندارد (به عنوان مثال آبده). دسته سوم رسوبات از یک ناحیه هیدرات بدون وجود ناحیه‌ای با سیالات متحرک تشکیل می‌شود. در دسته‌های دوم و سوم، لایه هیدرات درون ناحیه پایداری هیدرات قرار دارد و می‌تواند تحت شرایط تعادل یا پایدار قرار گیرد [۲].

۱- توزیع هیدرات در رسوبات متخلخل

رسوبات متخلخل دارای هیدرات گازی به‌طور معمول حاوی فازهایی شامل دانه‌سنگ، هیدرات گازی، آب آزاد و فاز گاز آزاد می‌باشد. گاز، معمولاً مرکز منافذ را اشغال می‌کند در حالی که منافذ کوچک یا منافذی که تنها به گلوگاه‌های کوچک راه دارند، به دلیل نیروهای موئینه ممکن است کاملاً اشباع از آب باشند (شکل-۱).

هیدرات‌ها توسط سه مکانیسم اصلی قابل تجزیه‌اند [۳]:

۱. کاهش فشار مخزن
۲. افزایش دمای مخزن

در دهه‌های اخیر پروژه‌های تحقیقاتی زیادی برای تعیین و ارزیابی مقدار هیدرات‌های گاز طبیعی انجام شده است. اگرچه در مورد پراکنندگی و مقدار هیدرات‌های گاز طبیعی در زمین عدم قطعیت زیادی وجود دارد، اما بر اساس آخرین اطلاعات جمع‌آوری شده برای هیدرات‌ها، منابع گازی در هیدرات‌های گاز طبیعی در حدود ۱۰^۵ تا ۱۰^۶ تریلیون متر مکعب بر آورد شده است (دپارتمان انرژی آمریکا، ۲۰۰۷).

هیدرات‌های گاز طبیعی، ترکیبات کریستالی متشکل از مولکول‌های گاز هستند که درون ساختاری قفس مانند از مولکول‌های آب قرار گرفته‌اند. تشکیل هیدرات‌های گازی به عواملی مانند فشار، دما، ترکیب گاز و حضور بازدارنده‌هایی مانند نمک بستگی دارد [۱].

رسوبات هیدرات گاز طبیعی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: دسته اول، از دو لایه تشکیل می‌شود؛ لایه هیدرات که در زیر آن ناحیه دو فاز با گاز آزاد (متحرک) قرار دارد. بیشتر، تولید از دسته اول مورد توجه بوده و برای تجزیه شدن هیدرات تغییرات اندک فشار و دما لازم است. دسته دوم نیز از دو ناحیه تشکیل می‌شود؛ لایه هیدرات که در زیر آن ناحیه‌ای

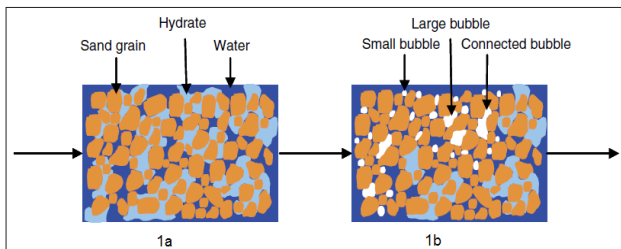
*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (Mosaheb_mojtaba@yahoo.com)

تجزیه توسط کاهش فشار، تحریک گرمایی و یا تزریق بازدارنده هستند. همچنین، فرآیند جایگزینی متان-دی اکسید کربن درون رسوبات حاوی هیدرات به عنوان یک روش جدید مدنظر قرار گرفته است. هر یک از این روش ها به تفصیل در ادامه مورد بحث قرار می گیرند:

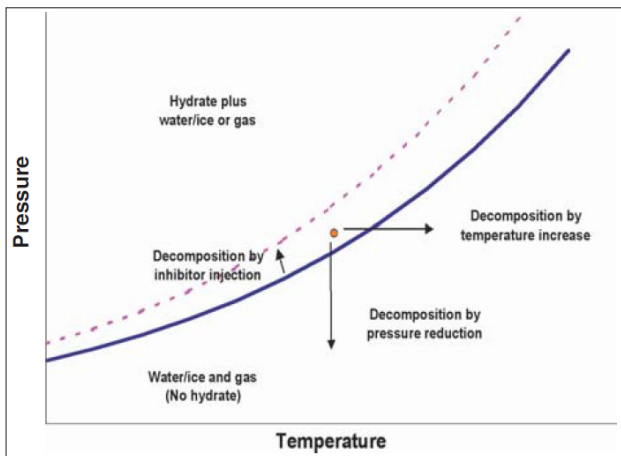
- در روش کاهش فشار، در دمای مخزن، فشار به زیر فشار تعادلی کاهش یافته، تجزیه هیدرات آغاز شده و گاز آزاد شده تولید می شود. معایب این روش، تولید مقدار زیاد آب و شن و از دست دادن هیدرات جامد است که باعث ناپایداری ژئومکانیکی می شود. با این وجود، روش کاهش فشار، اقتصادی ترین روش تولید است زیرا نیاز به انرژی زیادی ندارد [۱۴].

- تحریک گرمایی با اعمال حرارت انجام می شود؛ در فشار مخزن، دما از دمای تعادل عبور می کند. این عمل با تزریق سیال داغ و یا با گرم کردن مستقیم مخزن صورت می گیرد. این روش به انرژی گرمایی زیادی نیاز دارد و تجزیه هیدرات به نسبت، آهسته صورت می گیرد. روش تحریک گرمایی به صورت ترکیبی با کاهش فشار کاربرد مؤثری دارد و باعث جلوگیری از تشکیل مجدد هیدرات و پلاگ شدن می شود [۹].

- در روش تحریک شیمیایی با تزریق بازدارنده مانند گلایکول یا آب نمک، نمودار تعادلی به سمت بالا جابه جا می شود و دما و فشار مخزن خارج از ناحیه هیدرات قرار می گیرد. از این روش به عنوان روش اصلی



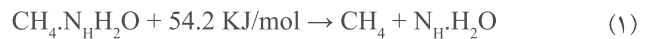
شکل ۱ | هیدرات گازی در رسوبات متخلخل



شکل ۲ | وضعیت تعادل ترمودینامیکی هیدرات گازی

۳. استفاده از مواد شیمیایی برای تغییر شرایط تعادل (بازدارنده های شیمیایی)

واکنش تجزیه هیدرات یک واکنش گرماگیر می باشد.



N_{H} عدد هیدراته شدن (hydration number) نام دارد که برای هیدرات متان برابر ۵/۷۵ است [۴]. به ازای هر مترمکعب هیدرات گازی در شرایط مخزن، حدود ۱۷۰ متر مکعب گاز در شرایط استاندارد به دست می آید [۵].

فرایند تجزیه هیدرات را می توان به دو صورت مدل تعادلی یا سینتیک انجام داد؛ در مدل تعادلی به محض اینکه فوگاسیته به کمتر از فوگاسیته تعادلی برسد، هیدرات تجزیه می شود. در مدل سینتیک، نرخ تجزیه هیدرات با اختلاف فوگاسیته تعادلی در دمای مشخص و فوگاسیته گاز نسبت مستقیم دارد. Bishnoi و Kim (۱۹۸۷) سینتیک تجزیه هیدرات را به صورت کمی بررسی کردند و معادله زیر را به دست آوردند [۶].

$$g_g = k_d M_g A_{\text{dec}} (f_g - f_g) \quad (2)$$

g_g نرخ آزاد شدن گاز، k_d ثابت سینتیک تجزیه هیدرات، M_g جرم مولی گاز، A_{dec} سطح ویژه، f_g فوگاسیته گاز و f_g فوگاسیته تعادل است.

Gamwo و Liu (۲۰۱۱) مدل سازی تعادلی و سینتیک را با هم مقایسه و عنوان کردند که تفاوت زیادی بین این دو مدل وجود دارد به طوری که مدل سینتیک نتایج دقیق تری را به دنبال دارد [۷].

۲- رفتار فازی مخازن هیدرات گازی

درصد مولی متان در فاز مایع به دلیل انحلال کم متان در آب، ناچیز است. از وجود آب در فاز بخار نیز می توان صرف نظر کرد. بنابراین، فاز مایع عموماً شامل آب و فاز بخار شامل گاز متان است. امکان وجود یا عدم وجود متان با شرایط تعادل ترمودینامیکی سیستم تعیین می شود در حالی که تشکیل یا تجزیه هیدرات به وسیله سینتیک کنترل می گردد. در شکل ۲- وضعیت تعادل ترمودینامیکی فازهای هیدرات، گاز و مایع نشان داده شده است.

معادله ۳ بیانگر تعادل ترمودینامیکی است [۸]:

$$P_e = \exp \left[a + \frac{b}{T} \right] \quad (3)$$

P_e فشار تعادلی، T دما و a و b ثابت های معادله هستند.

۳- روش های تولید از مخازن هیدرات گازی

روش های شناخته شده برای تولید گاز از هیدرات گاز طبیعی شامل



کنترل کننده افزایش فشار در مخزن به دلیل تجزیه لایه هیدرات است. تراوایی سازند در لایه گازی، تراوایی عمودی مؤثر گاز در لایه هیدرات، محل مشبک کاری‌ها و اشباع هیدرات گازی از جمله پارامترهای مؤثر بر تولید گاز هستند.

۵- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر میزان بازیافت گاز

Hong و همکاران (۲۰۰۳) تولید گاز از مخزن هیدرات گازی را مدل‌سازی کردند. شکل ۴- میزان تولید گاز را برای نفوذپذیری ۲۰ میلی داری نشان می‌دهد. راندمان تولید از مخزن بعد از ۳۰۰ روز حدود ۲۰ درصد است.

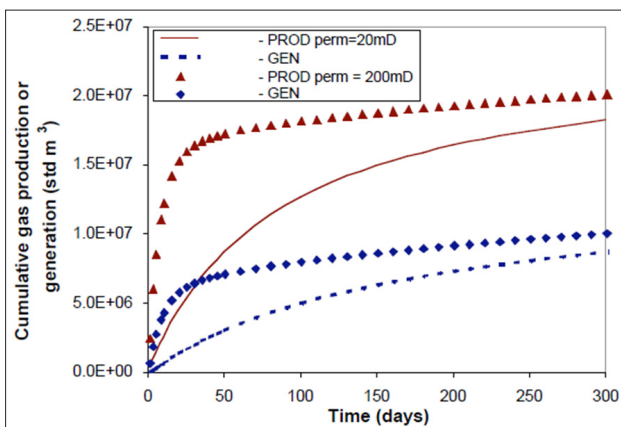
در شکل ۵- تأثیر تغییرات نفوذپذیری بر بازیافت گاز نشان داده شده است؛ بعد از ۳۰۰ روز تولید از مخزن، مقدار گاز تولیدی برای هر دو حالت ۲۰ و ۲۰۰ میلی داری تقریباً یکسان است. اگر نفوذپذیری کمتر از ۱۰ میلی داری باشد، عاملی کاهش دهنده برای تولید گاز خواهد بود [۱۳]. در شکل ۶- تأثیر تغییرات ضریب هدایت گرمایی سنگ بر تولید

برای تجزیه هیدرات استفاده نمی‌شود، اما به صورت یک روش تکمیلی کاربرد دارد. بازدارنده‌ها بیشتر در ممانعت از تشکیل هیدرات در خطوط لوله استفاده می‌شوند [۱۰].

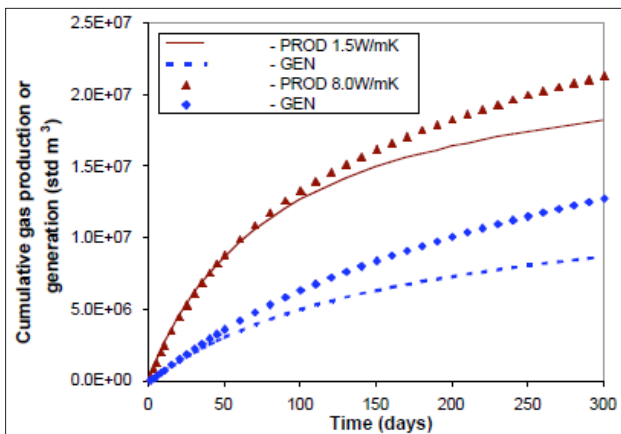
روش دیگر تولید از مخازن هیدرات گازی، تزریق و دفع دی اکسید کربن در یک فرآیند تبادل $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ است. وقتی هیدرات متان در معرض تشکیل دهنده‌های پایدارتری مانند دی اکسید کربن قرار گیرد، متان، آزاد شده و در نتیجه، دی اکسید کربن در یک فرآیند حالت جامد جایگزین می‌شود که به آن تبادل $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ می‌گویند. همان‌طور که در شکل ۳- نشان داده شده است، در دماهای پایین، هیدرات CO_2 نسبت به هیدرات متان از لحاظ ترمودینامیکی پایدارتر است [۱۱].

۴- بازیافت گاز از مخازن هیدرات گاز طبیعی

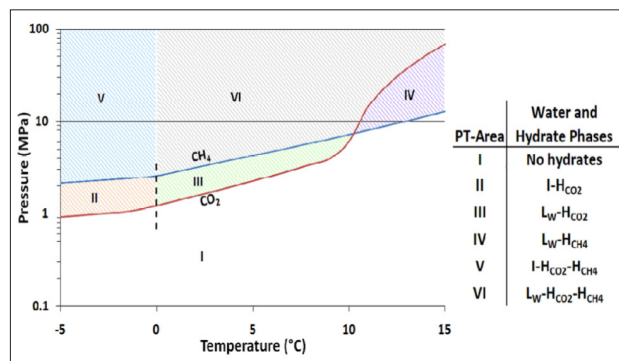
مدل‌های ارائه شده در رابطه با تولید از مخازن هیدرات گازی نشان می‌دهند که در زمان‌های طولانی، بازیافت نهایی با نفوذپذیری کنترل نمی‌شود بلکه انتقال حرارت از مرز بالایی و پایینی مخزن عامل



شکل ۵ اثر نفوذپذیری بر تولید گاز و میزان گاز آزاد شده از تجزیه هیدرات [۱۴]

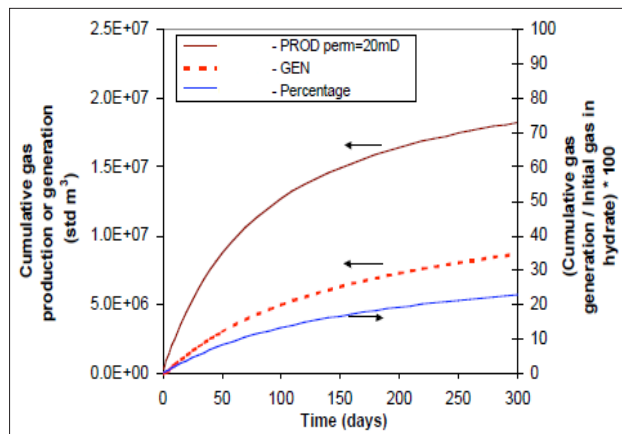


شکل ۶ اثر ضریب هدایت گرمایی سنگ بر میزان بازیافت گاز و تجزیه هیدرات به گاز [۱۴]

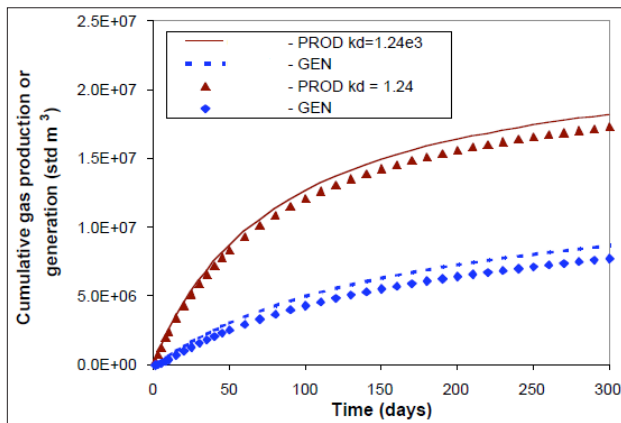


شکل ۳ دیگرام فازی هیدرات‌های متان و دی اکسید کربن. دیگرام به شش ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود. جدول سمت راست فاز آب و همچنین هیدرات پایدار در هر ناحیه را نشان داده است.

I = Ice, L_w = Liquid Water, H_{CO2} = CO₂-Hydrate, H_{CH4} = CH₄-Hydrate. [12]



شکل ۴ میزان بازیافت گاز و گاز آزاد شده در اثر تجزیه هیدرات در حالت نفوذپذیری ۲۰ میلی‌داری [۱۴]



شکل ۷ اثر ثابت سینتیکی بر تولید گاز و میزان گاز آزاد شده از تجزیه هیدرات [۴]

گازی داشته باشد. در زمان‌های طولانی تولید از مخزن هیدرات گازی، اگر نفوذپذیری بیش از ۱۰ میلی دارسی باشد، نفوذپذیری، عامل کنترل کننده تولید نخواهد بود. برای نفوذپذیری‌های کم (کمتر از ۱۰ میلی دارسی)، نفوذپذیری، عامل کاهش دهنده نرخ تولید گاز خواهد بود.

۵. تجزیه هیدرات، تولید طولانی مدت از مخزن هیدرات گازی را کنترل می‌کند. تجزیه هیدرات یک واکنش گرماگیر است و به میزان انتقال حرارت از مرزهای بالایی و پایینی مخزن و همچنین سرعت واکنش (سینتیک) بستگی دارد.

۶. ضریب انتقال حرارت عامل کنترل کننده خوبی برای بازیافت گاز به حساب می‌آید و با افزایش ضریب هدایت گرمایی، تولید گاز افزایش قابل توجهی خواهد داشت.

گاز نشان داده شده است؛ مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب هدایت گرمایی، میزان تجزیه هیدرات و همچنین تولید گاز افزایش می‌یابد. در شکل ۷- مشاهده می‌شود که با افزایش ثابت سینتیک و واکنش، میزان تجزیه هیدرات و در نتیجه بازیافت گاز افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

۱. مخازن هیدرات گاز طبیعی منابع ارزشمندی برای تولید گاز هستند. در ایران، مخازن هیدرات گازی در منطقه دریای عمان قرار دارند. استفاده از فناوری‌های جدید باعث افزایش موفقیت در تولید از این منابع عظیم گازی می‌گردد.
۲. مطالعه درباره وقوع و توزیع هیدرات گازی در مخازن، داده‌های خواص سنگ و سیال و چگونگی جریان سیال در محیط متخلخل این مخازن، برای پیش‌بینی دقیق روش تولید لازم است.
۳. تجزیه هیدرات گازی به روش کاهش فشار با حفز چاه در ناحیه پایدار هیدرات گازی (که باعث کاهش فشار به زیر فشار تعادلی و در نتیجه تجزیه هیدرات می‌شود)، تحریک گرمایی توسط اعمال منبع گرمایی در ناحیه پایدار هیدرات و یا تزریق محلول شیمیایی، سه روش شناخته شده برای تولید گاز از مخازن هیدرات گاز طبیعی می‌باشند. روش جدید دیگر، تولید فرآیند جایگزینی متان-دی‌اکسید کربن درون رسوبات حاوی هیدرات است که به دلیل کوچک‌تر بودن مولکول‌های دی‌اکسید کربن نسبت به متان، این جایگزینی انجام می‌گردد. از میان این روش‌ها کاهش فشار بر تجزیه هیدرات و بازیافت گاز موثرتر است.
۴. نفوذپذیری می‌تواند اثر زیادی بر فرآیند تولید گاز از مخازن هیدرات

منابع

- [1] Ji, C, Ahmadi, G, Smith DH(2003), -Constant Rate Natural Gas Production from a Well in a Hydrate Reservoir,|| Energy Convers Mgmt, Vol 44, pp 2403-2423.
- [2] G.J. Moridis, SPE, " Numerical Studies of Gas Production From Class 2 and Class 3 Hydrate Accumulations at the Mallik Site, Mackenzie Delta, Canada", Lawrence Berkeley Natl. Laboratory, U. of California, (2004).
- [3] Makogon, YF (1997), -Hydrate of Hydrocarbons,|| PennWell Publishing Co. Tulsa, Oklahoma.
- [4] H. Hong, M. Pooladi-Darvish, "A Numerical Study on Gas Production From Formations Containing Gas Hydrates", University of Calgary, (2003).
- [5] Yousif, MH, Abass, HH, Selim, MS, Sloan, ED(1991), -Experimental and Theoretical Investigation of Methane-gas-hydrate Dissociation in Porous Media,|| SPE 18320, pp 69-76.
- [6] Kim, HC, Bishnoi, PR, Heidemann, RA, Rizvi, SSH(1987), -Kinetics of Methane Hydrate Dissociation,|| Chem Eng Sci, Vol 42, No 7, pp 1645-1653.
- [7] Liu, Yong and Isaac K. Gamwo, -Comparison between equilibrium and kinetic models for methane hydrate dissociation,|| Chemical Engineering Science, 2011.
- [8] Burshears, M, Obrien, TJ, Malone, RD(1986), -A Multi-phase, Multidimensional, Variable Composition Simulation of Gas Production from a Conventional Gas Reservoir in Contact With Hydrates,|| SPE 15246, pp 449-453.
- [9] Holder, G. D. and Angert, P. F.: -Simulation of Gas Production from a Reservoir Containing Both Gas Hydrates and Free Natural Gas,|| paper SPE 11105 presented at the 1982 Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, September, (1982).
- [10] V.A. Kamath, SPE, P.N. Mutallk, SPE, M. Slra, SPE, and S.L Patil, SPE, U. of Alaska, "Experimental Study of Brine Injection and Depressurization Methods for Dissociation of Gas Hydrates", (1991).
- [11] Hester, K. C. and P. G. Brewer (2009). "Clathrate hydrates in nature." Ann Rev Mar Sci 1: 303327-.
- [12] Husebo, J. (2008). Monitoring Depressurization and CO₂-CH₄ Exchange Production Scenarios for Natural Gas Hydrates, University of Bergen.
- [13] Goel, N., Wiggins, M., and Shah, S.: -Analytical Modeling of Gas recovery from in Situ Hydrates Dissociation,|| Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 29, pp.1152001), 127-).
- [14] Sloan, E, Dendy, "Clathrate Hydrates of Natural Gases ", Marcel Dekker, INC (1998).