

Баяжуулах үйлдвэрийн флотацийн төхөөрөмжийн цахилгаан хөтлүүрт ухаалаг хяналт нэвтрүүлэх боломжийг судлах нь

Яндагсүрэнгийн ДОРЖСҮРЭН¹, Зоригоогийн МӨНХЖИН², Бөөрөнхийн ТЭМҮҮЖИН², OMAR Jaldin², PAULO Cipriano³

¹Монгол Улс, Улаанбаатар, Шинжлэх ухаан, технологийн их сургууль, Геологи, уул уурхайн сургууль, Эрдэс боловсруулалт, инженерчлэлийн тэнхим

²Монгол Улс, Өмнөговь аймаг, Оюу Толгой ХХК

³Australia, Brisbane, Rio Tinto Group

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: dorjsuren@must.edu.mn¹

Хураангуй: Баяжуулах үйлдвэрийн флотацийн хэсэгт нийт 64 ширхэг флотацийн төхөөрөмж ажиллах ба тус бүр нь 186 кВт чадалтай цахилгаан хөдөлгүүр болон хутгагчаар тоноглогдсон байдаг. Энэ төхөөрөмж нь флотацийн процессын тогтвортой ажиллагаанд чухал үүрэгтэй бөгөөд метал авалтад шууд нөлөөлдөг. Тус төхөөрөмжийн хамгийн хурдан элэгддэг бөгөөд байнгын засвар үйлчилгээ шаарддаг хэсгүүд нь цахилгаан хөдөлгүүр, хутгагч (agitator) зэрэг хөдлөх эд ангиуд юм. Уг эд ангиудын засварт реактив засварын аргыг хэрэглэж байсан ба халалт доргио зэрэг хяналтын параметруудийг хүний оролцоотойгоор, гар аргаар хэмжиж байв. Ингэснээр төлөвлөгөөт бус сул зогсолт, тоног төхөөрөмжийн эвдрэл гэмтэл цөөнгүй бүртгэгдэж байсан бөгөөд энэ нь засварын зардал нэмэгдэх, үйлдвэрлэлийн үр ашиг буурах шалтгаан болж байв. Энэхүү судалгааг флотацийн танкийн цахилгаан хөтлүүрт wireless real-time monitoring систем нэвтрүүлэх боломжийг тодорхойлох, түүний үр ашгийг тооцох зорилгоор хийв. Шинэ систем нь хөдөлгүүрийн температур, доргио зэрэг оношилгооны гол параметруудийг тасралтгүй хянаж, өгөгдлийг төв серверт дамжуулах замаар эвдрэлээс урьдчилан сэргийлэх, засвар үйлчилгээний төлөвлөлтийг оновчтой болгох, найдвартай ажиллагааг хангах нохицөлийг бүрдүүлнэ. Тус хяналтын төхөөрөмжийг нэвтрүүлэхээс өмнө төхөөрөмжүүдийн эвдрэлээс үүдэлтэй нийт сул зогсолт сүүлийн 12 жилийн байдлаар 1137.8 цаг байгаа ба түүний 70 % [1] мэдээллийг урьдчилан авч чадаагүйтэй холбоотой юм. Wireless real-time monitoring технологи ашигласнаар хөдөлгүүр болон хутгагч руу нэмэлт кабель татахгүйгээр хяналт тавих боломжтой тул мэдрэгчийн суурилуулалт, засварын ажиллагаа хялбаршина. Real-time хяналт нь оператор, инженерүүдийг шуурхай мэдээллээр ханган, шийдвэр гаргалтыг оновчтой болгох боломжийг бүрдүүлнэ.

Түлхүүр үг: *Wireless monitoring system, хөдөлгүүр, хутгагч (agitator), доргионы хяналт, температурын хяналт.*

I. УДИРТГАЛ

Баяжуулах үйлдвэрийн флотацийн процесс нь нарийн хяналт, найдвартай ажиллагаа шаарддаг, эрчим хүч өндөр зарцуулттай технологийн дамжлага юм. Тухайлбал, Оюу Толгойн баяжуулах үйлдвэрийн флотацийн хэсэгт нийт 64 ширхэг хөвүүлэн баяжуулах төхөөрөмж ажиллаж, тус бүр нь 186 кВт чадалтай цахилгаан хөдөлгүүр болон хутгагчаар тоноглогдсон байдаг. Эдгээр төхөөрөмжийн цахилгаан хөтлүүрүүд нь метал авалтад шууд нөлөөлдөг, байнгын засвар, үйлчилгээ шаарддаг төхөөрөмж юм.

Сүүлийн 12 жилийн (2013-2025) хугацаанд флотацийн цахилгаан хөтлүүртэй холбоотойгоор (цахилгаан хөдөлгүүр болон хутгагч) нийт 10109 тооны засвар үйлчилгээ бүртгэгдэж, 191780.8 цагийн сул зогсолт үүссэн байна [2]. Үүний 13.1%-ийг РМ01 кодтой хуваарьт төлөвлөгөөт зогсолт, 86.3%-ийг РМ02 кодтой нэмэлт төлөвлөгөөт зогсолт, ойролцоогоор 0.6%-ийг РМ03 кодтой эвдрэлээс шалтгаалсан төлөвлөгөөт бус зогсолт тус тус эзэлсэн байна. Хэдийгээр РМ03 засварын (сул зогсолт) эзлэх хувь харьцангуй бага хэдий ч энэ нь 1137.8 цагийн зогсолт болох ба энэ нь үйлдвэрийн бүтээмжид ихээхэн сөрөг нөлөө үзүүлэх юм. Учир нь РМ03 кодтой эвдрэлийн тоо 112 байх ба түүний нийт хугацаа 1137.8 цаг байгааг задлаж үзвэл, нэг эвдрэлд ногдох дундаж сул зогсолт 10.2 цаг байна. Энэ нь бусад ангиллуудтай харьцуулахад өндөр үзүүлэлт

бөгөөд эвдрэл бүрийн ард ихээхэн сөрөг үр дагавар байгааг илэрхийлж байна. Ийнхүү засварын дундаж хугацаа их байгаа нь оношилгоо хангалтгүй, урьдчилан сэргийлэх боломжгүй байсныг илтгэж байна.

Механик доголдол, доргио, халалттай холбоотой эвдрэлүүдийн 70% нь real-time мониторинг нэвтрүүлээгүй буюу predictive maintenance байхгүйтэй холбоотой болохыг нэр бүхий судалгааны хүрээлэн болон судлаачид тогтоосон байдаг [1], [3]. Тус мэдээлэлд үндэслэвэл, дунджаар РМ03 ангиллын эвдрэлүүдийн 70% нь оношилгооны мэдээлэл хангалтгүйтэй холбоотой гэж үзэж болно. Өөрөөр хэлбэл 112 эвдрэлийн 78 эвдрэл нь real-time мониторинг байхгүй, урьдчилан сэргийлэх боломж байгаагүйтэй холбоотой юм.

Одоогийн байдлаар үйлдвэрт халалт, доргио зэрэг параметруудийг гар аргаар, хүний оролцоотойгоор хэмждэг. Энэ нь реактив засвар давамгайлах, төлөвлөгөөт бус эвдрэл нэмэгдэх, засварын зардал өсөх зэрэгт нөлөө үзүүлж байна [4], [5].

Ийм учир real-time wireless monitoring системийг нэвтрүүлэх нь үр дүнтэй юм. Уг технологи нь хөдөлгүүр болон хутгагчийн температур, доргио зэрэг оношилгооны гол параметруудийг тасралтгүй хянаж, өгөгдлийг төв серверт дамжуулах замаар эвдрэлээс урьдчилан сэргийлэх, засварын төлөвлөлтийг оновчтой болгох, найдвартай ажиллагааг хангах боломжийг бүрдүүлнэ. Wireless

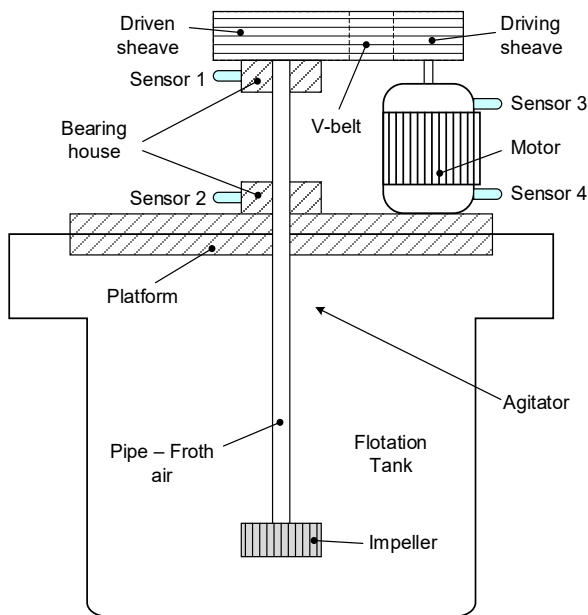
хяналтын систем нь нэмэлт кабель татах шаардлагагүй тул мэдрэгчийн суурилуулалт, засварын ажиллагаа хялбаршиж, оператор, инженерүүдийг шуурхай мэдээллээр хангах, шийдвэр гаргалтыг оновчтой болгох нөхцөлийг бүрдүүлнэ [6].

Мөн энэхүү ухаалаг wireless хяналтын системийг зөвхөн флотацийн төхөөрөмжөөс гадна бутлуур (1000 кВт), туузан конвейерүүд (7 x 710 кВт, CVB001 & CVB002), бөөрөнцөгт тээрмүүд (10 x 5700 кВт), дайрган бутлуурууд (3 x 746 кВт) зэрэг үйлдвэрийн бусад чухал тоноглолууд дээр нэвтрүүлэхээр зорьж байна.

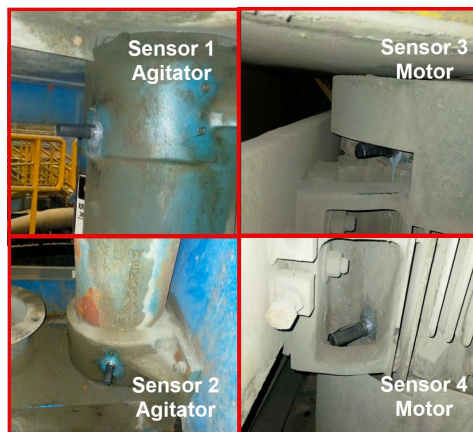
II. СУДАЛГААНЫ АРГАЧЛАЛ

Энэхүү судалгаанд 2013 оны 4 сарын 5-аас 2025 оны 11 сарын 3 хүртэлх хугацаанд бүртгэгдсэн эвдрэл, сул зогсолтын мэдээллийг авч үзсэн болно [2]. Өгөгдөлд РМ кодоор ангилсан эвдрэлийн тоо, сул зогсолтын үргэлжлэх хугацаа, засварын шалтгаан зэрэг үзүүлэлтүүд багтсан бөгөөд эдгээрийг задлан шинжилж, оношилгооны мэдээлэл хангалтгүй байснаас үүдэлтэй эвдрэлүүдийн хувь хэмжээг тооцсон.

Угсралтын ажлыг дараах зургийн дагуу гүйцэтгэж, мэдрэгчүүдийг цахилгаан хөдөлгүүрийн болон хугагчийн (agitator) хөтлөх тал (drive end) ба үл хөтлөх талд (non-drive end) тус тус суурилуулсан.



1-р зураг. Флотацийн төхөөрөмжийн ерөнхий бүтэц болон мэдрэгч суурилуулах байршил.



2-р зураг. Бодит төхөөрөмж дээр мэдрэгчүүдийг суурилуулсан байдал.

Суурилуулсан мэдрэгчүүд нь доргионы хурд болон температур зэрэг параметруудийг тасралтгүй хэмжиж, өгөгдлийг трансмиттерээр дамжуулан төв серверт илгээдэг. Энэхүү real-time өгөгдөл нь эвдрэлээс урьдчилан сэргийлэх, засварын төлөвлөлтийг оновчтой болгох, хяналтын системийн найдвартай ажиллагааг хангах үндсэн суурь болно [7], [8], [9].



3-р зураг. Мэдрэгчээс мэдээлэл хүлээн авч, төв серверт илгээх трансмиттер.

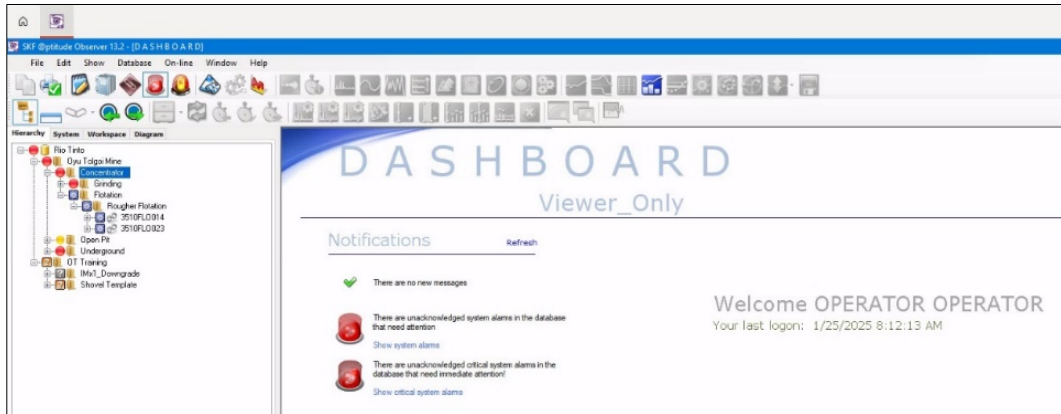
III. ҮР ДҮН

Wireless real-time monitoring системийг флотацийн цахилгаан хөтлүүрт амжилттай суурилуулж, мэдрэгчүүдийг хөтлөх болон үл хөтлөх талд байрлуулан доргионы хурд, температур зэрэг параметруудийг тасралтгүй хянаж эхлээд байна. Системийн өгөгдөл дамжуулалт тогтмолжиж, хяналтын платформоор дамжуулан бүх өгөгдлийг цаг алдалгүй, онлайн горимоор хянах боломж бүрдсэн.

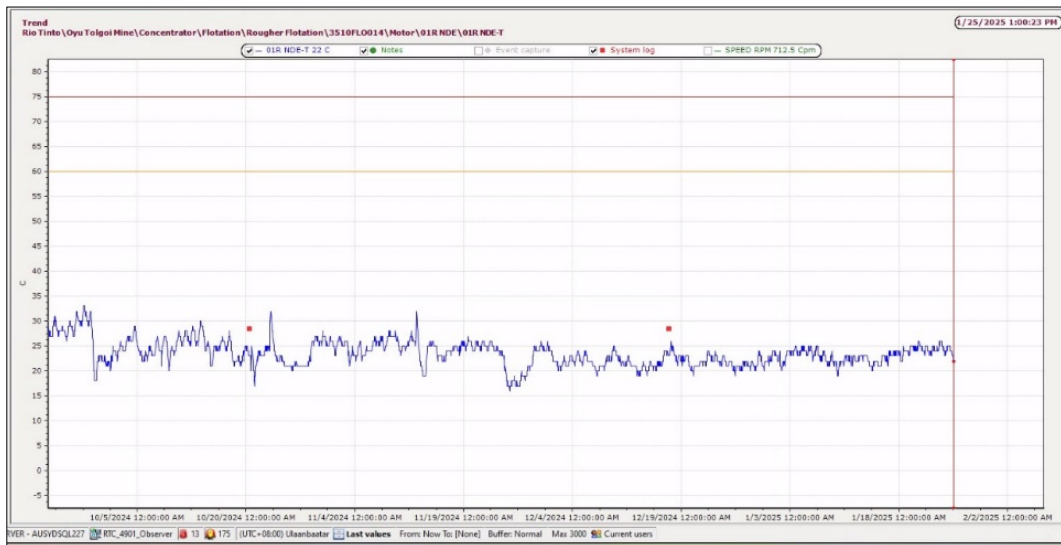
Эхний байдлаар:

- Хүний оролцоо буурч, гар аргаар хэмжилт хийх шаардлага арилсан.
- Оношилгооны өгөгдөл real-time байдлаар хяналтын серверт дамжуулагдаж, эвдрэлээс урьдчилан сэргийлэх боломж нэмэгдсэн.

Хяналтын системийн график, өгөгдөл цуглуулсан байдлыг дараах зургуудаар харуулав.



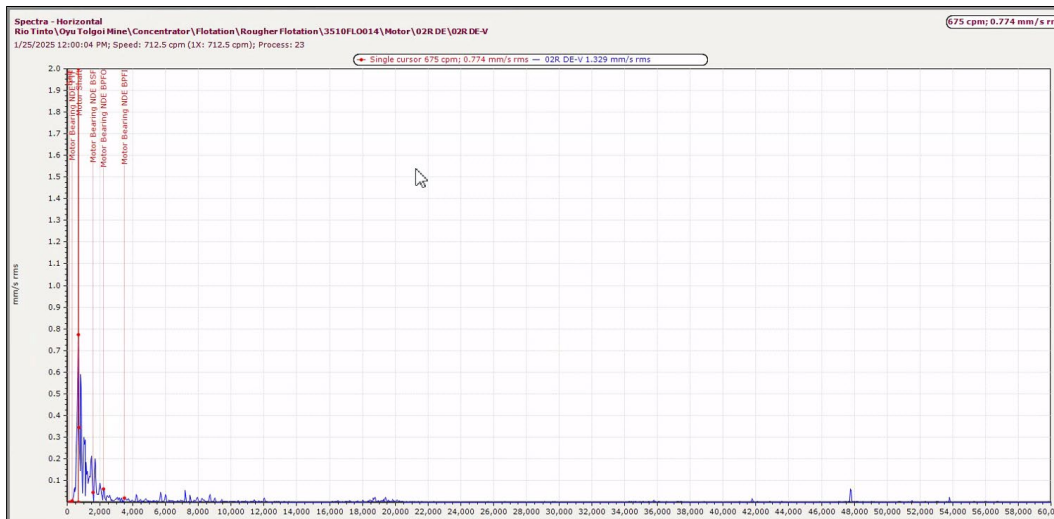
4-р зураг. SKF wireless condition monitoring system-ийн хяналтын дэлгэц.



5-р зураг. Флотацийн цахилгаан хөтлүүрийн температурын real-time хяналтын утга.



6-р зураг. Флотацийн цахилгаан хөтлүүрийн доргионы real-time хяналтын утга.



7-р зураг. Флотацийн цахилгаан хөтлүүрийн доргионы real-time spectre анализ.

Case Study – May 24: Rougher Flotation Electric Motor Lubrication Fault

The Problem: Deficient Lubrication

On May 24, the Flotation FLO-014 agitator experienced a 3x increase in electric motor bearing vibration levels after a refurbished motor was installed, triggering alarms. Investigation revealed the refurbished motor’s bearings were insufficiently greased, leading to metal-to-metal contact and elevated vibration readings. If the issue was not identified on time using the Smart Plant online monitoring systems, the motor would have failed catastrophically in couple of days generating production losses and increasing maintenance costs.

The Solution: Lubricated Bearings

The bearing was lubricated, effectively reducing vibration levels to acceptable limits. This action prevented unplanned downtime and safeguarded the electric motor and other components from secondary damage. The motor repairer was informed of the issue and instructed to improve their lubrication practices and acceptance testing.

Savings:

4 Hours

Downtime Avoided

RioTinto OT Smart Plant – Identified Defects and Business Impact

8-р зураг. Флотацийн цахилгаан хөтлүүрт доргионы real-time хяналтыг хэрэгжүүлсэн үед гарсан хэмнэлт.

Энэхүү хяналтын системийг үр дүнтэй ашигласнаар засварын төлөвлөлт нарийсч, сул зогсолтын эрсдэл буурч, PM03 кодтой эвдрэлүүдийн хяналт сайжирч, эвдрэл тус бүрт ногдох хугацаа буурах зэрэг үр дүн гарах хүлээлттэй байна.

Тухайлбал Рио Тинто группын зөвлөх Пауло Сиприаногийн (Paulo Cirgiano) гаргасан тайланд доргионы real-time хяналтыг нэвтрүүлж, тосолгооны хугацааг оновчилсноор 4 цагийн төлөвлөгөөт бус зогсолтоос урьдчилан сэргийлсэн [10] гэсэн үр дүн гарсан ба цаашид үүнтэй төстэй олон эерэг үзүүлэлтүүд гарах төлөвтэй байна. Энэ нь зөвхөн флотацийн машин дээр гарсан бодит хэмнэлт бөгөөд цаашид бусад төхөөрөмжид нэвтрүүлсэнээр энэ хэмнэлт илүү нэмэгдэх боломжтой.

IV. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Судалгааны хүрээнд флотацийн танкийн цахилгаан хөтлүүрт wireless real-time monitoring системийг туршилтаар суурилуулж, мэдрэгчүүдийг

хөдөлгүүрийн хөтлөх болон үл хөтлөх талд байрлуулан доргионы хурд, температур зэрэг параметруудийг онлайн горимоор хянаж эхлээд байна. Эхний үр дүн гарч, хяналтын өгөгдөл тогтмол цуглуулагдаж байгаа бөгөөд параметруудийг графикаар дүрслэн хянах боломж бүрдсэн. Энэ нь системийн суурилуулалт амжилттай хийгдсэн, өгөгдөл дамжуулалт тогтвортой явагдаж байгааг харуулж байна.

Real-time хяналтын систем нь флотацийн төхөөрөмжийн доголдлыг урьдчилан илрүүлэх, засварын төлөвлөлтийг оновчтой болгох боломжтойг харуулж байгаа ба цаашид бүх флотацийн хөтлүүрүүд дээр тус системийг өргөтгөн суурилуулах төсөл хэрэгжиж байна.

Түүнчлэн конвейер, бутлуур, бөөрөнцөгт тээрэм гэх зэрэг бусад тоног төхөөрөмжүүдэд энэхүү ухаалаг хяналтыг нэвтрүүлж үйлдвэрийн тасралтгүй ажиллагааны түвшинг нэмэгдүүлэн, бүтээмжийг өсгөхөөр ажиллаж байна. Бидний (Пауло

Сиприаногийн тайлан) тооцооноор ухаалаг хяналтыг нэвтрүүлснээр үйлдвэрийн хэмжээнд цаашид 748 цагийн сул зогсолтыг бууруулах боломжтой ба уг үр дүнд хүрэх зорилгоор 2802 ширхэг мэдрэгчийг нэмэлтээр суурилуулахаар төлөвлөж байна [10].

Мөн уг хяналтын системийг хиймэл оюун ухааны алгоритмтай холбож, эвдрэл, гэмтлийг урьдчилан таамаглах боломжийг бүрдүүлэхээр ажиллаж байна.

V. ДҮГНЭЛТ

Флотацийн цахилгаан хөтлүүрт wireless real-time monitoring системийг суурилуулснаар хяналтын өгөгдлийг тасралтгүй, онлайн горимоор хүлээн авч, эвдрэлээс урьдчилан сэргийлэх, засварын төлөвлөлтийг оновчтой болгох боломж бүрдсэн. Судалгааны эхний үр дүнгээр хүний оролцоо буурч, параметруудийг графикаар хянах боломжтой болсон нь системийн үр нөлөөг харуулж байна. Ялангуяа оношилгооны мэдээлэл хангалтгүй байснаас үүдэлтэй РМ03 кодтой эвдрэлүүдийн тоо 60% орчим буурах боломжтой юм.

Энэхүү хяналтын систем нь зөвхөн хяналт төдийгүй, инженерийн шийдвэр гаргалт, засварын стратеги, найдвартай ажиллагааны үзүүлэлтэд чухал эерэг нөлөө үзүүлэх ба цаашид уг системийг бүх хөтлүүрт өргөтгөн нэвтрүүлэх, хиймэл оюун ухааны алгоритмтай холбож гэмтлийг урьдчилан таамаглах боломжийг бүрдүүлэхээр ажиллаж байгаа нь үйлдвэрлэлийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, засварын зардлыг бууруулах, эвдрэлээс урьдчилан сэргийлэхэд чиглэсэн чухал алхам юм.

Цаашид уг ухаалаг хяналтыг уурхай даяар нэвтрүүлэх ба үр дүнд нь төлөвлөгөөт бус сул зогсолт 748 цагаар буурах боломжтой гэсэн тооцооллыг гаргаад байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

- [1] “Predictive Maintenance: Taking pro-active measures based on advanced data analytics to predict and avoid machine failure,” Analytics institute. [Online]. Available: https://www.beekeeper.io/wp-content/uploads/2024/10/Deloitte_Predictive-Maintenance_PositionPaper.pdf
- [2] SAP system. Rio Tinto.
- [3] C. Hagedorn, J. Huegle, and R. Schlosser, “Understanding unforeseen production downtimes in manufacturing processes using log data-driven causal reasoning,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 33, no. 7, pp. 2027–2043, Oct. 2022, doi: 10.1007/s10845-022-01952-x.
- [4] Theodor D. Popescu, Dorel Aiordachioaie, and Anisia Culea-Florescu, “Basic tools for vibration analysis with applications to predictive maintenance of rotating machines: an overview,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. Volume 118, pp. 2883–2899, 2022.
- [5] Mohamed Er-Ratby, Abdessamad Kobi, Youssef Sadraoui, and Moulay Saddik Kadiri, “The Impact of Predictive Maintenance on the Performance of Industrial Enterprises,” vol. 6, Jan. 2025.
- [6] “SKF web.” [Online]. Available: <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring-systems>
- [7] R. Shah, V. Mittal, and M. Lotwin, “Recent Advances in Vibration Analysis for Predictive Maintenance of Modern Automotive Powertrains,” *Vibration*, vol. 8, no. 4, p. 68, Nov. 2025, doi: 10.3390/vibration8040068.
- [8] Muhammad Bin Irfan, Umair Ahmed, and Taha Siddiqui, “Predictive Maintenance Strategies for Oil and Gas Facilities Using AI-Based Vibration Monitoring,” *Proc. Int. Field Explor. Dev. Conf. 2023*, pp. 305–312, Mar. 2024.
- [9] Imane El Boughardini, Meriem Hayani Mechkouri, and Kamal Reklaoui, “A Predictive Maintenance System Based on Vibration Analysis for Rotating Machinery Using Wireless Sensor Network (WSN),” *Int. Conf. Adv. Intell. Syst. Sustain. Dev.*, pp. 93–106, June 2023.
- [10] C. Paulo, Case study -May 24.